



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE SISTEMAS
CRÍTICOS EN PLANTA DE FLOTACIÓN DE ESCORIA, UTILIZANDO LA
METODOLOGÍA RCM3**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA

LAURA SANDRA SANTOS LAGOS

PROFESOR GUÍA:
RAYMI VÁSQUEZ MORENO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RODRIGO PASCUAL JIMÉNEZ
VIVIANA MERUANE NARANJO

SANTIAGO DE CHILE

2024

EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE SISTEMAS CRÍTICOS EN PLANTA DE FLOTACIÓN DE ESCORIA, UTILIZANDO LA METODOLOGÍA RCM3

Con el paso del tiempo, las industrias de diversos rubros se han visto en la obligación de idear y perfeccionar métodos de producción con el fin de satisfacer la demanda de productos y servicios. La eficiencia, costos, efectividad e impacto ambiental son factores que pueden delimitar la rentabilidad de la compañía, por esto se han desarrollado técnicas y herramientas que permiten tomar decisiones beneficiosas y generar cambios significativos en la producción. Codelco, busca aplicar estas metodologías para optimizar los sistemas críticos en su línea de producción, focalizándose en el tratamiento de escoria.

El propósito del presente trabajo es mejorar la eficiencia de los sistemas productivos y la gestión de activos en la industria. El objetivo principal consiste en diseñar estrategias de mantenimiento basadas en la metodología RCM3 para incrementar la confiabilidad de sistemas críticos de la Planta de flotación de escoria de Codelco, división El Salvador. Los objetivos específicos incluyen la selección y aplicación de RCM3 en un sistema crítico de la planta y desarrollar un programa para dar seguimiento y evaluar el plan de mantenimiento.

La metodología aplicada en este trabajo consiste en realizar una revisión bibliográfica de la planta, seguida por un análisis de criticidad de los equipos usando Matriz de Riesgo y Jack Knife. Luego, se lleva a cabo un levantamiento de la situación actual de los equipos críticos, escogiendo el sistema a evaluar. Seguidamente, se desarrolla su contexto operacional, el análisis de modos y efectos de falla mediante FMECA, y la aplicación de análisis causa raíz a los modos de falla críticos. Finalmente, se procede con la selección de estrategias de mantenimiento y el cálculo y proyección de indicadores RAM.

Se demostró que los equipos críticos fueron el molino de bolas y el molino SAG, descubriendo que sus causas raíces principales radican en fallas en el sistema de lubricación y desregulación del sistema de alimentación. Se desarrolló un plan de mantenimiento para los modos de falla críticos y sus causas raíces, considerando estrategias de mantenimiento preventivo, predictivo y monitoreo de la condición. Esto permitió trazar los indicadores de confiabilidad, proyectándolos y resolviendo que se cumple el objetivo principal, incrementando la confiabilidad del sistema.

Finalmente se concluye que las nuevas tecnologías implementadas logran contribuir a mejorar el proceso en términos de continuidad operativa mediante el aumento de las confiabilidades de ambos equipos, no obstante, se pueden implementar medidas complementarias tanto para el análisis que condujo al plan de mantenimiento desarrollado como para la implementación y proyección de resultados.

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que me apoyaron durante este proceso, a mi familia, amigos, compañeros y docentes, por brindarme su comprensión, orientación y ánimo en los momentos más difíciles.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo general	2
1.1.2. Objetivos específicos	2
1.2. Alcances	3
2. Antecedentes	4
2.1. Planta de flotación de escoria	4
2.1.1. Proceso productivo	4
2.2. Metodologías de mantenimiento	6
2.2.1. Diferencias entre RCM y TPM	6
2.2.2. Éxito del RCM	6
2.2.3. Actualización de RCM2 a RCM3	7
2.3. Técnicas de análisis de criticidad	8
2.3.1. Matriz de riesgo	8
2.3.2. AHP	9
2.3.3. Jack Knife	9
2.4. Metodología RCM3	10
2.4.1. Formación del equipo natural de trabajo	11
2.4.2. Selección del sistema y definición del contexto operacional	11
2.4.3. Metodologías de análisis de fallas	12
2.4.3.1. Árbol de fallas	12
2.4.3.2. HAZOP	13
2.4.3.3. Análisis FMECA	15
2.4.3.3.1. Definición de funciones y estándares de operación	15
2.4.3.3.2. Estado de falla	15
2.4.3.4. Modos de falla	16
2.4.3.4.1. Efectos de falla	16
2.4.3.4.2. Consecuencias y riesgos de falla	17
2.4.4. Análisis causa raíz	17
2.4.4.1. Cinco porqués	18
2.4.4.2. Diagrama ISHIKAWA	18

2.4.4.3.	Árbol lógico de falla	18
2.4.5.	Estrategias de mantenimiento	18
2.5.	Ingeniería de la confiabilidad	19
2.5.1.	Indicadores de confiabilidad	19
2.5.2.	Balanced Scorecard	22
3.	Metodología	23
3.1.	Estructura	23
3.2.	Recursos	24
4.	Aplicación de la metodología RCM3	25
4.1.	Análisis de criticidad	25
4.1.1.	Evaluación preliminar de confiabilidad	36
4.1.1.1.	Evaluación del estado de los equipos	41
4.1.2.	Selección del sistema crítico	42
4.1.3.	Balanced Scorecard	42
4.2.	Contexto operacional del sistema de molienda	44
4.2.1.	Propósito	45
4.2.2.	Descripción general del sistema	45
4.2.3.	Condiciones ambientales	46
4.2.4.	Descripción específica del proceso	48
4.2.5.	Equipos del sistema	49
4.2.5.1.	Molino SAG	50
4.2.5.2.	Molino de bolas	52
4.2.5.3.	Seguridad operacional y dispositivos	53
4.2.6.	Diagrama EPS	54
4.3.	Análisis de modos y efectos de fallas (FMECA)	55
4.3.1.	Funciones	55
4.3.2.	Estados de falla	59
4.3.3.	Modos de falla	60
4.3.4.	Efectos de falla	61
4.3.5.	Consecuencias y riesgos de falla	62
4.3.6.	Diagrama FMECA	65
4.3.7.	Criticidad de los modos de falla	65
4.4.	Análisis Causa Raíz de modos de falla críticos	66
4.4.1.	Molino de bolas	66
4.4.1.1.	Desalineamiento del cabezal con el muñón y carcasa	66
4.4.1.2.	Desgaste o fractura de los revestimientos de levante	68
4.4.1.3.	Lubricación insuficiente de rodamientos principales	70
4.4.2.	Molino SAG	72
4.4.2.1.	Desgaste o fractura de la unión del cabezal con la carcasa y muñón	72

4.4.2.2.	Desgaste, rotura, deformación o desprendimiento del respaldo	74
4.4.2.3.	Falla en el variador de frecuencia	76
4.4.3.	Hallazgos	78
4.5.	Plan de mejoramiento	79
4.5.1.	Estrategias de mantenimiento	79
4.5.2.	Desarrollo de las estrategias	81
4.5.2.1.	Alineamiento del cabezal	81
4.5.2.2.	Revestimientos de levante	82
4.5.2.3.	Variador de frecuencia del motor principal	83
4.5.2.4.	Sistema de alimentación	83
4.5.2.5.	Sistema de lubricación de rodamientos principales	85
4.5.2.6.	Sistema de control	86
4.5.3.	Seguimiento	86
4.6.	Proyección de Confiabilidad	88
5.	Análisis de resultados	94
6.	Conclusiones	96
	Bibliografía	98
	Anexos	102
Anexo A.	Diagramas P&ID de detalle de los molinos	103
Anexo B.	Diagramas P&ID de detalle de los molinos	105
Anexo C.	Tablas de riesgo de los molinos	107
Anexo D.	Diagrama FMECA del molino de bolas	111
Anexo E.	Diagrama FMECA del molino SAG	127
Anexo F.	Árbol lógico de decisión del mantenimiento	143

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad, la optimización de los sistemas productivos y la eficiencia en la gestión de activos se han posicionado como prioridades ineludibles dentro de las industrias. En un entorno empresarial cada vez más desafiante, las organizaciones buscan alcanzar mejores resultados, optimizar costos operativos, maximizar la confiabilidad de sus equipos y minimizar su impacto ambiental. Bajo esta premisa, el estudio de la Planta de flotación de escoria en División El Salvador de Codelco adquiere una importancia crítica. El proceso general de la planta se representa en la figura 1.1, destacando en color rojo el sistema en estudio en específico. Esta planta, focalizada en el negocio de fundición impacta directamente en el rendimiento y la recuperación metalúrgica, elementos fundamentales para el éxito operativo y económico de la organización. Además, su baja disponibilidad, confiabilidad y utilización representan desafíos que requieren atención inmediata. La relevancia de este estudio se intensifica al considerar que la planta es una fuente de datos sustanciales y de calidad aceptable para análisis detallados. La optimización de esta planta no solo contribuirá a la mejora de los resultados operativos de Codelco, sino que también permitirá avanzar hacia prácticas más sostenibles y eficientes en la gestión de activos.

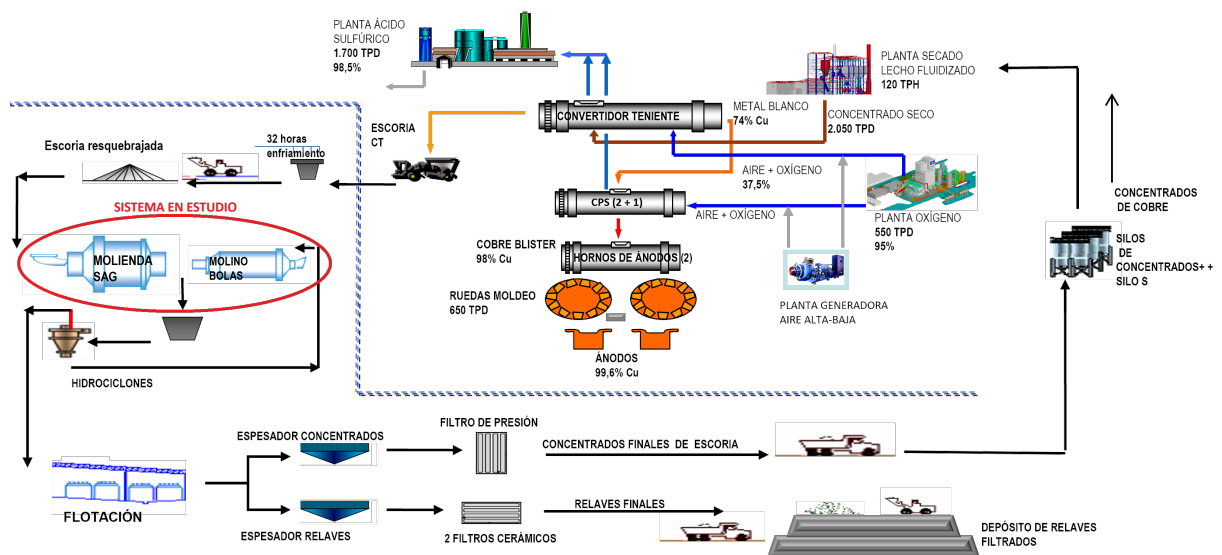


Figura 1.1: Proceso general de la Planta de flotación de escoria. [1].

La metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM3), establece criterios de selección de actividades de mantenimiento en base a la criticidad de los activos de un sistema operacional, considerando los efectos de los distintos modos de falla que puede presentar un sistema y el impacto que generan al ambiente, seguridad y operaciones de una organización [2]. En este sentido, la aplicación de esta metodología como pilar para potenciar el desarrollo óptimo industrial se muestra altamente efectiva y prometedora.

Para llevar a cabo este proyecto, se examina la información oficial de la planta, las características del proceso de tratamiento de escoria, datos relativos a los equipos, contexto operacional, eventos de fallos, costos, entre otros aspectos relevantes. Se detallan las herramientas esenciales para la ejecución del trabajo, entre ellas, técnicas de análisis de criticidad como la matriz de riesgo y Jack Knife. Asimismo, se proporciona una explicación minuciosa de la metodología RCM3, abordando sus pasos, definiciones clave y presentando el proceso integral de análisis y toma de decisiones que conlleva. Además, se exhiben de manera explícita los resultados inmediatos para cada fase de la implementación del RCM3.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Diseñar estrategias de mantenimiento basadas en la metodología RCM3 para incrementar la confiabilidad de sistemas críticos de planta de flotación de escoria.

1.1.2. Objetivos específicos

1. Identificar los sistemas críticos en la planta de flotación de escoria de Codelco.
2. Analizar la operación y mantenimiento actual de los sistemas críticos para determinar las principales causas de falla.
3. Seleccionar un sistema crítico y aplicar la metodología RCM3.
4. Identificar los posibles modos de falla del sistema crítico y sus consecuencias.
5. Evaluar la criticidad de los modos de falla para establecer el nivel de atención requerido.
6. Definir las estrategias de mantenimiento.
7. Desarrollar los indicadores de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad (*RAM*, por sus siglas en inglés *Reliability, Availability, and Maintainability*) para evaluar y medir la efectividad del plan de mantenimiento.
8. Establecer un programa de seguimiento y evaluación del plan de mantenimiento.

1.2. Alcances

- Selección del sistema crítico de acuerdo al nivel de riesgo y a su relevancia en la operación del proceso de tratamiento de escoria.
- Diseño de estrategias de mantenimiento aplicando RCM3 para un sistema crítico en específico de la planta.
- Análisis RCM3 incluye identificación de modos de falla, evaluación de criticidad de los mismos y definición de estrategias de mantenimiento.
- Medición de impacto del plan de mantenimiento utilizando indicadores RAM.
- El plan de mantenimiento se presentará en el informe comprendiendo recomendaciones y acciones para su implementación.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Planta de flotación de escoria

La Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco), desempeña un rol fundamental en la economía chilena y figura como un actor destacado en la escena global de la industria minera. Con una participación que representa aproximadamente el 6% de las reservas mundiales de cobre [3], la empresa se especializa en la exploración, desarrollo, producción y comercialización de cobre y sus subproductos asociados. Cuenta con diversas divisiones mineras distribuidas a lo largo de Chile, siendo una de ellas División El Salvador ubicada en la Región de Atacama, específicamente en la comuna Diego de Almagro, provincia de Chañaral.

División El Salvador se involucra en variadas actividades en el proceso del cobre, las que comprenden desde la extracción y procesamiento inicial del mineral hasta operaciones más especializadas, incluyendo el chancado, el enfriamiento y manipulación de escorias, así como la molienda y flotación. Estas etapas son fundamentales en la obtención de cobre y subproductos, contribuyendo así a la posición destacada de Codelco en la industria minera.

Bajo este propósito, en El Salvador opera una planta de flotación de escoria, proceso esencial en la estrategia de recuperación de concentrado de cobre, que busca maximizar la eficiencia del proceso metalúrgico.

2.1.1. Proceso productivo

En la figura 2.1, se puede apreciar el diagrama de bloques del proceso de tratamiento de escoria, en el que se identifican las áreas de la planta en color amarillo, el flujo de escoria en rojo, el flujo de aguas en azul y los reactivos en color verde.

El proceso productivo inicia con la recepción de escoria líquida proveniente del Convertidor Teniente, con un contenido medio de cobre del 7,94%. Esta escoria se transporta en ollas hasta el área de enfriamiento (área 2000), donde se deja por un período de 32 horas. Las primeras 2 horas sin agregar agua, seguidas de 30 horas con adición de agua. Después

de este período, la olla se inclina para eliminar el líquido excedente y se transporta para su vaciado en el área de acopio. En este lugar, un tractor con oruga metálica fragmenta la escoria para obtener tamaños menores a 10 pulgadas. Posteriormente, esta se traslada a una tolva de almacenamiento y luego al sector de molienda (área 3200), que incluye un molino SAG, un molino de bolas y una batería de hidrociclones. En esta etapa, el producto alcanza una granulometría del 80 % (P80) bajo 44 μm , con un contenido de sólidos del 25 al 30 %.

El producto de la molienda se envía a un estanque acondicionador de la planta (área 3300), donde se añaden los reactivos necesarios para la flotación. Desde este estanque, se alimentan dos líneas de flotación idénticas, cada una con celdas Rougher y celdas Scavenger. El concentrado Rougher constituye el concentrado final, mientras que el concentrado Scavenger es recirculado al estanque acondicionador, siendo este el relave final. Luego, el relave y concentrado se dirigen a su respectivo espesador (área 3400). Ambos espesadores permiten alcanzar una concentración de sólidos del 60 %. El agua del overflow se envía a un estanque de agua de proceso para ser reutilizada. Los suministros de agua, reactivos de flotación y aire requeridos por la planta, conforman el área 3100.

Finalmente, el concentrado final se envía a un filtro de presión de placas horizontales (área 3500) para obtener un queque filtrado con 8 a 10 % de humedad. Este material se transporta a un silo de concentrado de escoria en la fundición. El relave final se somete a filtración en dos filtros cerámicos (área 3500), generando un queque con un 12 % de humedad que se transporta y deposita en el Depósito 1 de relave final filtrado (área 4000).

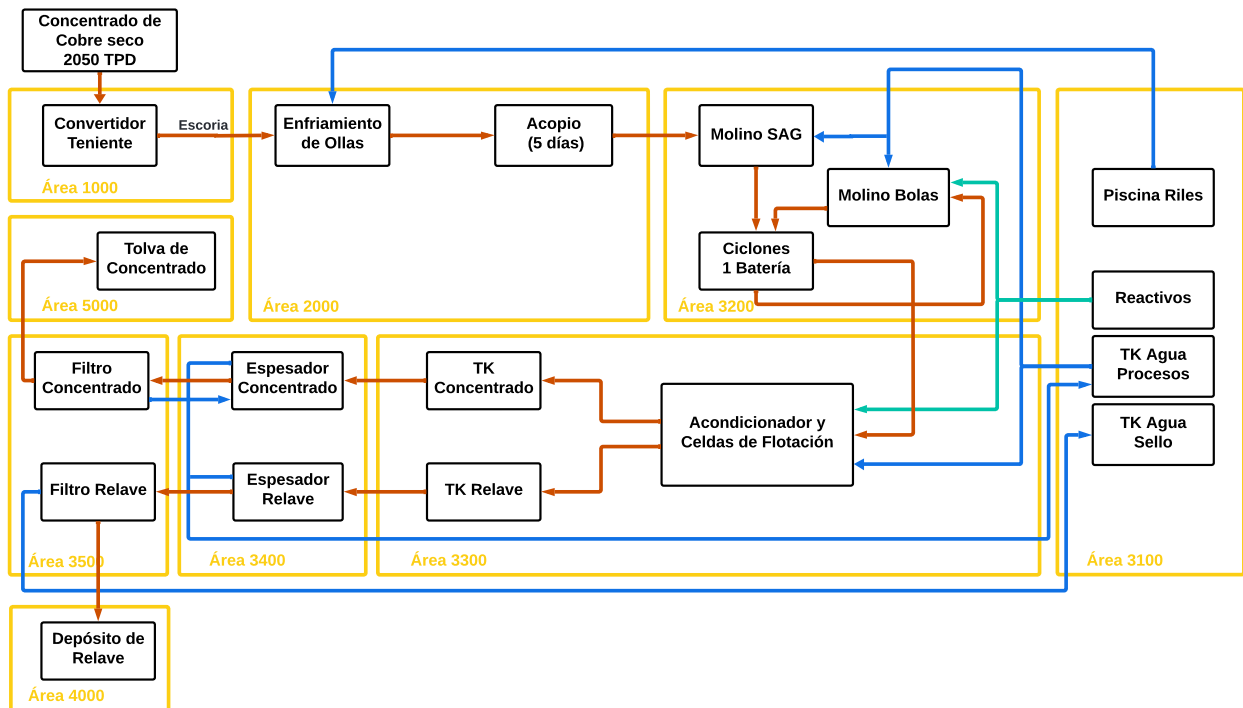


Figura 2.1: Diagrama de bloques del proceso [1].

2.2. Metodologías de mantenimiento

En la industria, existen diversas metodologías de mantenimiento, siendo el Mantenimiento Productivo Total (*TPM*, por sus siglas en inglés) y el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (*RCM*, por sus siglas en inglés) dos de las más utilizadas.

El TPM involucra a todos los niveles y funciones de una organización con la intención de maximizar la efectividad general de los equipos de producción. Este método afina los procesos y equipos existentes reduciendo errores y accidentes. Además, se estructura en torno a ocho pilares fundamentales, como el mantenimiento autónomo, las mejoras enfocadas, entre otros [4]. Por su parte, el RCM es una estrategia de mantenimiento a nivel corporativo diseñada para optimizar el programa de mantenimiento de una empresa o instalación. La implementación exitosa del RCM conduce a la aplicación de estrategias específicas de mantenimiento para cada uno de los activos de la instalación, aprovechando herramientas para la planificación del mantenimiento, la supervisión del estado de los activos, el mantenimiento predictivo y preventivo para evitar costosas averías en los equipos [5].

2.2.1. Diferencias entre RCM y TPM

Las principales diferencias entre las metodologías de RCM y TPM residen en sus estrategias de implementación y enfoques operativos. El RCM adopta un método de ejecución de arriba hacia abajo, enfocado en la experiencia y capacidad de liderazgo de quienes son elegidos para gestionar el proyecto. En contraste, el TPM cuenta con un equipo calificado y multidisciplinario con integrantes de diferentes niveles jerárquicos, donde se establece que nadie conoce el proceso y sus necesidades mejor que el propio operador. Al centrarse en los sistemas físicos, los usuarios realizan las acciones que estiman más conveniente para mantener el nivel deseado de operatividad de un determinado sistema en servicio, asegurando que pueda cumplir su función [6].

Al tratarse de modelos competitivos de la gestión del mantenimiento que tienen el mismo objetivo general, pero diferentes marcos de implementación, no se puede afirmar que uno sea superior al otro. En particular, en el presente caso de estudio se emplea la metodología RCM porque se adecúa de mejor forma a los objetivos planteados inicialmente. La estructura y enfoque de este método conceden una planificación más detallada y específica para cada sistema, evaluando los activos críticos en pos de mejorar la confiabilidad y disponibilidad de los sistemas, vitales para la operación continua y eficiencia de la planta.

2.2.2. Éxito del RCM

Durante las últimas tres décadas, esta metodología ha sido adoptada por una amplia gama de industrias. Su correcta aplicación permite obtener los siguientes beneficios [7]:

- Mayor seguridad y protección del medio ambiente.

- Mejores desempeños operativos.
- Mayor control de los costos del mantenimiento.
- Una amplia base de datos de mantenimiento.
- Mayor motivación de las personas, especialmente el que participa en la realización de los análisis.

Dentro de los casos de éxito de la aplicación de la metodología RCM2 se encuentran los siguientes hechos:

1. En una empresa petroquímica la cantidad de reportes de falla en una extrusora en un año disminuyó de 700 a 6.
2. En una empresa de transporte fluvial se ahorraron un millón de dólares en seis meses por la eliminación de tareas innecesarias, revisión de frecuencias y capacitación.
3. En una empresa siderúrgica se ahorraron 200 mil dólares en operación del sistema de aire comprimido, aumentando un 27 % las operaciones exitosas en el cambiador de rollos.
4. En una empresa de alimentos el tiempo de detención se redujo entre 5 % y 8 %, el rendimiento aumentó en un 65 % y se duplicó la rentabilidad.
5. En una empresa minera se incrementó en un 10 % la disponibilidad en un equipo móvil.

2.2.3. Actualización de RCM2 a RCM3

RCM2 ha sido ampliamente reconocido y utilizado como una de las metodologías líderes en el mantenimiento de la confiabilidad, aplicado en diversas áreas. En respuesta a las necesidades y desafíos actuales que enfrentan las organizaciones, surgió la necesidad de evolucionar, originando la metodología RCM3 [8].

Los cambios introducidos por RCM3 pueden parecer pequeños o incluso insignificantes, no obstante, representan una desviación significativa del proceso RCM definido por la norma SAE JA1011, con beneficios sustanciales y un cambio en la forma en que se implementa e interpreta. RCM3 crea un capítulo dedicado a la definición de estrategias de mantenimiento y gestión de riesgos. La gestión de la confiabilidad se ha vuelto altamente especializada y, con la introducción de nuevos estándares y tecnologías, el RCM3 coloca la confiabilidad en la cima de los sistemas de gestión de la organización y se integra completamente con otros enfoques basados en riesgos, como la causa raíz, análisis de fallas e inspección basada en riesgos [8].

Ambas versiones de esta metodología se aplican a todo tipo de equipos, instalaciones, y procesos. Sin embargo, el RCM3 se enfoca principalmente en identificar los riesgos asociados con las fallas, cuantificarlos y determinar la mejor manera de lidiar con ellos. Al considerar tanto el riesgo físico (ambiental y de seguridad) como el económico en su conjunto, se facilita

reducir o eliminar el riesgo del activo defectuoso a un nivel que sea perfectamente tolerable por la organización en la que se encuentra [8].

Aladon, el propietario de las marcas comerciales de estas metodologías, resume las principales diferencias entre RCM3 y RCM2 de la siguiente manera [8]:

- RCM3 supera los estándares SAE y amplía la capacidad de RCM2 para alinearse con los últimos sistemas de gestión ISO aceptados internacionalmente (ISO 55000 para gestión de activos e ISO 31000 para gestión del riesgo).
- RCM3 está totalmente integrado con otros sistemas de gestión de riesgos empresariales.
- RCM3 no es una iniciativa más, parece ser un proceso de gestión de riesgos empresariales con potencial para convertirse en el sistema de gestión más importante para mejorar la seguridad de los procesos y la integridad de los activos.
- RCM3 es la mejor respuesta a los desafíos y expectativas que presenta la 4^a generación de mantenimiento.

2.3. Técnicas de análisis de criticidad

En línea con los objetivos, se requiere identificar los equipos y modos de falla críticos. Por consiguiente, se debe realizar una evaluación de criticidad que clasifique y jerarquice los sistemas, equipos, fallas, instalaciones, entre otros. Esto, basándose en criterios establecidos por las distintas herramientas de análisis, donde generalmente se estudian factores de seguridad, ambiente, producción, costos, frecuencias de falla y tiempo de reparación.

En primer lugar, se deben definir los alcances y el propósito del estudio para determinar qué criterios es conveniente analizar y seleccionar el método más adecuado.

2.3.1. Matriz de riesgo

Es un modelo que evalúa y visualiza los riesgos asociados a distintos eventos. Consiste en una tabla o matriz en la que se representan los niveles de probabilidad y consecuencia de un riesgo específico, y se asigna un valor correspondiente. Esta matriz se compone de dos ejes: el eje vertical representa la frecuencia, y el eje horizontal los niveles de consecuencia.

Numéricamente, el riesgo se determina como la frecuencia multiplicado por la consecuencia. La frecuencia corresponde al número de fallas en un tiempo determinado. La consecuencia (C) suma los valores asignados a cada criterio, según como muestra la ecuación 2.1, donde PR es el impacto en la producción, FO la flexibilidad operacional, CM el costo de mantenimiento y SHA el impacto en seguridad humana y medio ambiente [9]:

$$C = PR + FO + CM + SHA \quad (2.1)$$

En cada celda de la matriz se asigna un nivel de riesgo en función de la intersección entre la probabilidad y la consecuencia. Por lo general, se utiliza una escala de colores o números para indicar los diferentes niveles de riesgo, como por ejemplo, colores que van desde verde (bajo riesgo) hasta rojo (alto riesgo) o números del 1 al 5.

2.3.2. AHP

El proceso de análisis jerárquico, *The Analytic Hierarchy Process* (AHP), es un método multicriterio para la toma de decisiones que utiliza la comparación de variables jerárquicas. Primeramente, se debe estructurar el problema definiendo los elementos a evaluar e identificando los criterios y subcriterios relevantes para el problema en cuestión. Igualmente, se construye una jerarquía que represente las relaciones de dependencia entre dichos criterios.

Posteriormente, se comparan los criterios de forma pareada para determinar su importancia relativa. Para ello, se utiliza la escala de preferencias de Saaty [10], que toma valores de 1 a 9. Esta matriz de comparación por pares, se completa asignando los valores al comparar las filas con las columnas, de manera tal que predomine el criterio de la fila, otorgando valores enteros, en caso contrario, se calcula como el inverso multiplicativo. Con estos valores se determinan los pesos relativos de los criterios, es decir, empleando la suma geométrica por condición y normalizando en función de la suma total. Luego se arma una matriz ponderada con los elementos y criterios para calcular su importancia, contemplando los pesos calculados. Finalmente se debe evaluar la consistencia de los resultados, mediante el cálculo del ratio de consistencia (CR) que debe ser menor al 10 % (ecuación 2.2). Este se determina con el índice de consistencia (CI) y el índice aleatorio (RI). Este último depende del número de elementos y se obtiene de una tabla estándar que proporciona valores de RI para diferentes tamaños de matrices. [11].

$$CR = \frac{CI}{RI} \leq 0,1 \qquad CI = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \qquad (2.2)$$

Donde $\lambda_{m\acute{a}x}$ es el valor propio de la matriz de comparación y n el número de elementos comparados.

2.3.3. Jack Knife

La técnica del diagrama de dispersión Jack Knife consiste en evaluar y comparar diferentes elementos en una gráfica en base a su tasa de falla y tiempo medio de reparación (MTTR) para determinar su nivel de criticidad. Para realizar este análisis, primero se recopilan los datos de interés y se calculan los indicadores mencionados, así como la indisponibilidad de cada elemento.

A continuación, se trazan los resultados en un gráfico, representando las fallas en el eje x y el MTTR en el eje y, incluyendo las medias de estos tres parámetros como referencia,

según se aprecia en el diagrama de ejemplo de la figura 2.2. La gráfica resultante permite visualizar la criticidad de cada elemento, dada su posición en el gráfico. Los elementos que se encuentren en el cuadrante con alta tasa de falla y MTTR serán considerados más críticos, afectando negativamente su disponibilidad y rendimiento.

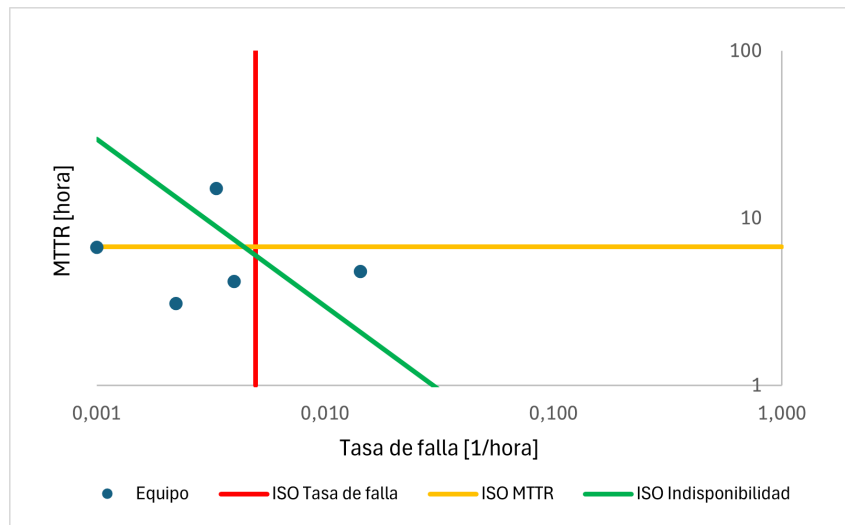


Figura 2.2: Diagrama de Jack Knife, ejemplo. Elaboración propia.

Adicionalmente, se puede representar la dispersión del costo global específico de mantenimiento (en eje x) con la indisponibilidad (en eje y) para analizar el impacto económico de los elementos fuera de servicio [12].

2.4. Metodología RCM3

El mantenimiento centrado en confiabilidad, conocido por sus siglas en inglés *RCM: Reliability Centered Maintenance*, se enfoca en identificar y abordar los modos de falla de un equipo que pueden tener un impacto significativo en la operación, seguridad y medio ambiente, desarrollando estrategias de mantenimiento efectivas que maximicen la confiabilidad, disponibilidad y rendimiento de los activos [13].

El proceso de RCM [14] implica abordar ocho interrogantes fundamentales, las que se alinean con las normas ISO 31000 e ISO 55000:

1. ¿Cuáles son las condiciones de funcionamiento (cómo se utiliza el equipo o el sistema)?
2. ¿Cuáles son las funciones y los estándares de desempeño asociados al activo en su contexto operativo actual?
3. ¿De qué manera deja de cumplir sus funciones (estados fallidos)?
4. ¿Qué causa cada estado fallido (modos de falla)?
5. ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla (efectos de falla y gravedad de las consecuencias)?

6. ¿Cuáles son los riesgos asociados con cada falla (riesgo inherente cuantificado)?
7. ¿Qué se debe hacer para reducir los riesgos intolerables a un nivel tolerable (utilizando estrategias proactivas de gestión de riesgos)?
8. ¿Qué se puede hacer para reducir o gestionar los riesgos tolerables de forma rentable?

Para afrontar las preguntas planteadas, existe un esquema estructurado a seguir para la aplicación de la metodología, consistente en una serie de pasos sistemáticos que guían el proceso de análisis y toma de decisiones.

2.4.1. Formación del equipo natural de trabajo

Como primera medida, se debe conformar un equipo natural de trabajo, siendo este un conjunto de personas que colaboran voluntariamente para lograr un objetivo común. Los miembros pueden tener diferentes roles y responsabilidades, los que deben trabajar de manera coordinada, comprometidos con los acuerdos del equipo, manteniendo una comunicación fluida, apoyo mutuo, comprensión, respeto y confianza. Dentro de las diferentes funciones de los integrantes de la organización se encuentra el rol de facilitador, experto en metodología RCM, encargado de garantizar que su implementación se realice de manera correcta; los especialistas del área de estudio; el programador, persona que otorga una visión sistémica de la situación; los mantenedores, calificados en mantenimiento y reparación de sistemas y equipos; los operadores, profesionales en el manejo de equipos y sistemas; e ingeniero de procesos, quien aporta una visión global de los procesos [2].

2.4.2. Selección del sistema y definición del contexto operacional

Constituido el equipo de trabajo y seleccionada el área que se quiere analizar para el diseño de un plan de mantenimiento, se debe determinar el nivel de detalle requerido con la finalidad de profundizar en el estudio de los modos y efectos de falla. En vista de ello, se definen los siguientes términos:

- Parte: Unidad de descomposición mínima mantenible para un equipo.
- Equipo: Conjunto de partes que conforman un elemento funcional independiente.
- Sistema: Grupo de equipos que cumplen funciones específicas requeridas por una planta.
- Planta: Interconexión de sistemas para procesar recursos y ofrecer un producto o servicio.
- Área: Conjunto de plantas que colaboran en la elaboración de productos.

Cada una de las denominaciones anteriores dan cuenta de un grado de precisión distinto, siendo más común y recomendado analizar a nivel de sistemas, dado que proporcionan una perspectiva más integral de cómo se relacionan las partes o componentes, y al mismo tiempo, brindan información puntual y específica considerando los equipos que lo conforman

[2]. Adicionalmente, este análisis está sujeto a una jerarquización, ligada a la prioridad de mantenimiento de un equipo por sobre otro, lo que permite seleccionar el objeto de estudio con las herramientas propuestas en la sección 2.3.

Posteriormente, se debe distinguir el contexto operativo del bien para comprender y describir todos los aspectos relacionados con su funcionamiento. En primer lugar, se desarrollan las funciones del sistema que caracterizan el propósito y desempeño de su configuración, describiendo los equipos, procesos y dispositivos de seguridad involucrados, junto con determinar los objetivos respecto a seguridad, medio ambiente, operación y planes futuros. Con ese fin, es conveniente utilizar un diagrama EPS que identifica las entradas, procesos y salidas, facilitando el entendimiento del contexto operacional [9].

- Entradas: Corresponden a la materia prima o recursos utilizados como insumos por el proceso, sistema y/o equipo; los servicios necesarios para la transformación de la materia prima; los sistemas de control y sus efectos sobre los equipos, sistemas o procesos.
- Procesos: Descripción de la función del sistema en un lugar específico.
- Salidas: Funciones del sistema clasificadas en productos primarios, principales metas del sistema; productos secundarios, derivados de las funciones primarias; controles y alarmas, asociadas a funciones de protección.

Por otro lado, es importante detallar la relación del sistema con el personal, especificando la rotación de turnos de trabajo, operaciones, mantenimiento y los parámetros de calidad establecidos. Además, se debe especificar la división de los procesos en sistemas menores, definiendo límites de operación y listando componentes, indicadores y dispositivos de seguridad.

Como base, se sugiere recopilar información del perfil y ambiente de operación, calidad y disponibilidad de las entradas requeridas, políticas de repuestos, recursos, logística, diagramas de procesos e instrumentación (P&ID), esquemas generales y diagramas de bloques [2].

2.4.3. Metodologías de análisis de fallas

Las metodologías de análisis de fallas son herramientas fundamentales en la gestión de activos, permitiendo identificar, evaluar y mitigar los riesgos operacionales. Entre las más utilizadas se encuentran el análisis HAZOP, el análisis FMECA y el árbol de falla, cada uno con enfoques específicos para abordar distintos aspectos de los sistemas.

2.4.3.1. Árbol de fallas

El análisis de árbol de fallas es un método deductivo que ordena de manera sistemática las posibles combinaciones de fallas que pueden desencadenar eventos no deseados en un equipo, sistema o proceso. Consiste en elaborar un diagrama que representa gráficamente las relaciones causales entre las diferentes fallas y condiciones, lo que permite identificar las causas

raíces y desarrollar medidas de mantenimiento para mitigar los riesgos identificados.

En la cúspide del árbol se ubica el evento o estado no deseado denominado evento principal, T en el diagrama de ejemplo 2.3, desde el cual se van identificando y relacionando mediante funciones lógicas las diferentes causas que contribuyen a dicho evento, terminando en eventos básicos. Se utilizan conectores lógicos tales como el OR para eventos que pueden causar el evento principal de forma individual, el conector AND cuando depende de la ocurrencia conjunta de dos o más eventos y el INHIBIT para eventos que su ocurrencia se condiciona por cierta circunstancia.

Posteriormente, se realizan dos análisis. En primer lugar, el análisis cualitativo que emplea el álgebra booleana para sintetizar el árbol de fallas y obtener un grupo mínimo de modos de falla. Por otro lado, el análisis cuantitativo calcula la probabilidad de ocurrencia del evento principal a través de la probabilidad de los eventos básicos [15].

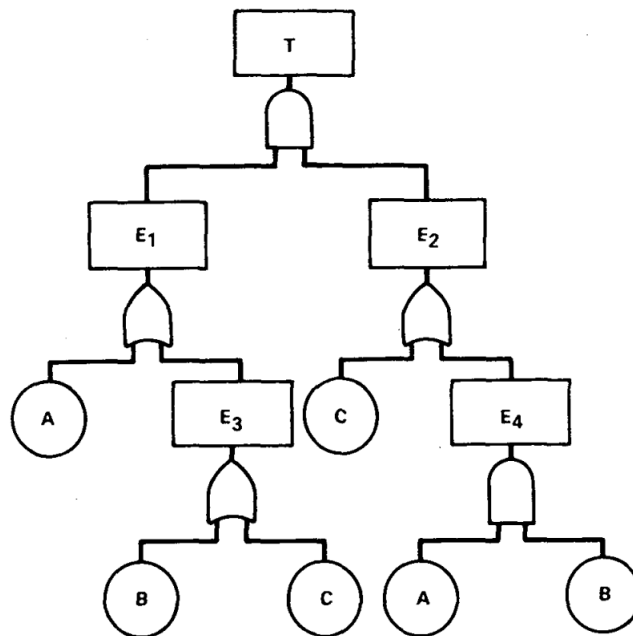


Figura 2.3: Árbol de fallas, ejemplo. [15].

2.4.3.2. HAZOP

El análisis de riesgos y operatividad (*HAZOP*, por sus siglas en inglés) se utiliza para identificar y evaluar situaciones de riesgos en ámbitos de salud, seguridad, medio ambiente y operatividad dentro de sistemas complejos. Se centra en diagnosticar las desviaciones respecto a las condiciones de diseño operacionales que podrían representar riesgos potenciales, examinando las posibles causas y consecuencias que estos implican, y determinando las acciones recomendadas para el tratamiento del riesgo. Para ello, se consideran los efectos que tienen las fallas sobre las personas, propiedad interna y externa a la planta, el medio ambiente, la calidad del producto, la productividad, entre otros factores.

Para aplicar con éxito esta metodología, se requiere un procedimiento estructurado [16].

1. Definición de alcances, objetivos, fronteras y preparación: Se deben establecer los alcances del análisis, incluyendo los límites del sistema, operaciones, relaciones entre sistemas y subsistemas, objetivos, así como realizar una recopilación de antecedentes del proceso, como diagramas de flujo, diagramas de proceso e instrumentación (P&ID), filosofías de control y manuales de operación. Esto permite estimar la duración y planificación del estudio.
2. Descomposición del sistema: El sistema a analizar debe dividirse en secciones o subsistemas manejables (nodos) de acuerdo al nivel de detalle requerido en función de la complejidad y el riesgo de las consecuencias, a menudo siguiendo el flujo de proceso y utilizando diagramas de bloques para su representación.
3. Descripción e intención de diseño del subsistema: En esta etapa, se describe detalladamente cada sección del sistema descompuesto, incluyendo su intención o función de diseño, parámetros claves, propósito, rango operacional de diseño, materiales, componentes principales y funciones operativas. Se considera cómo interactúa el subsistema dentro del sistema global, entre otros aspectos relevantes para comprender su diseño y funcionamiento.
4. Formulación de desviaciones: Las desviaciones se definen usando palabras claves y parámetros que expresen el tipo específico de variación, como mayor, menor, no hay, inversa, entre otras opciones.
5. Identificación de Causas y Consecuencias: Para cada desviación identificada se analizan exhaustivamente las posibles causas y sus consecuencias, evaluando su criticidad dada por la frecuencia de falla y severidad de las consecuencias.
6. Salvaguardias: Se identifican las medidas de protección que puedan mitigar los riesgos asociados a las desviaciones, ya sea considerando o descartando las medidas existentes. Estas pueden incluir sistemas de alarma, procedimientos operativos, equipos de seguridad, entre otros.
7. Recomendaciones y acciones: Basándose en las desviaciones y las salvaguardias, se desarrollan recomendaciones con el objetivo de mejorar la seguridad y la operatividad del sistema. Estas recomendaciones pueden implicar cambios en el diseño, mejoras en los procedimientos operativos o la implementación de nuevas medidas de control.
8. Registro: Todo el proceso de análisis, que abarca desviaciones, causas, consecuencias, salvaguardias y recomendaciones se documenta en profundidad, facilitando el seguimiento e implementación de las acciones recomendadas.

2.4.3.3. Análisis FMECA

El análisis de los modos, efectos y criticidad de falla (FMECA), permite identificar estrategias de mantenimiento y optimizar su gestión dentro de una organización, logrando responder cinco de las preguntas planteadas en la metodología RCM. Su objetivo es detectar los posibles modos de falla y consecuencias de un activo dentro de un proceso, teniendo en cuenta la seguridad, medio ambiente y producción. La aplicación de este análisis conlleva seguir varias etapas, comenzando por la definición de las funciones y estándares de operación del activo, continuando con la identificación de los estados, modos, efectos, consecuencias y riesgos de falla [13].

2.4.3.3.1. Definición de funciones y estándares de operación

Para establecer los requisitos de mantenimiento de un activo, es crucial comprender claramente sus funciones, definiendo su propósito o misión dentro de un contexto operacional específico. Es por ello que el proceso de RCM aborda la pregunta número 2: ¿Cuáles son las funciones y los estándares de desempeño asociados al activo en su contexto operativo actual? En términos de estructura, una función debe contener un verbo, un objeto y el nivel de desempeño deseado [2]. Estas funciones se clasifican en cinco categorías distintas:

- Funciones primarias: Tareas o misión central que un activo debe realizar para garantizar el correcto funcionamiento y rendimiento óptimo del sistema.
- Funciones secundarias: Labores complementarias que realiza un activo en capacidad de apoyar las funciones primarias. Estas pueden ser del tipo contención, para retener el material; soporte, como apoyo estructural; apariencia; higiene y seguridad.
- Funciones de protección: Resguardar al activo y proteger al personal de posibles efectos de falla.
- Funciones de control: Monitorear la condición de operación del activo.
- Funciones subsidiarias: Tareas complementarias a las funciones primarias, no esenciales para el funcionamiento básico del sistema, pueden incluir características adicionales.

Otro punto a considerar para complementar la definición de una función, corresponde a delimitar los estándares de ejecución de un activo, introduciendo un parámetro que permita detallar, cuantificar y evaluar su función con respecto al desempeño esperado. En este sentido, cada función involucra al menos dos estándares de operación: según lo que se espera que el activo cumpla y lo asociado a la capacidad o confiabilidad inherente del activo. Adicionalmente, se pueden incluir aspectos como la calidad del producto, seguridad, eficiencia energética, ambiente, entre otros.

2.4.3.3.2. Estado de falla

Tras definir las funciones, se continúa identificando los estados de falla, también conocidos como fallas funcionales. Estos se producen cuando se percibe una pérdida o deterioro en la

capacidad del activo para cumplir con sus funciones previstas. Es decir, ocurren cuando el activo deja de realizar la tarea para la cual fue diseñado o no las desempeña de manera adecuada.

Las fallas pueden manifestarse como una pérdida total (detención) o parcial (ineficiente) de las funciones del activo. Esto puede incluir el incumplimiento de los estándares de desempeño, como límites superiores e inferiores, estándares de desempeño variables, sistemas de medición (manómetros e indicadores), así como al contexto operacional.

2.4.3.4. Modos de falla

La definición de funciones y fallos funcionales de los activos propicia el nivel de mantenimiento requerido. Los fallos funcionales tienen causas físicas, conocidas como modos de falla, que deben ser abordados mediante el análisis RCM. Así, un modo de falla se define como cualquier evento que provoca un estado fallido y los mecanismos que conducen al estado fallido [14].

Estos modos de falla se determinan a partir de dos categorías: causa y mecanismo. La causa de falla se refiere al evento que desencadena el estado fallido y su descripción debe conjugar un sustantivo y un verbo. Por otro lado, el mecanismo del modo de falla es la circunstancia que conduce a un evento que podría causar un estado fallido y su descripción debe contener suficientes detalles para seleccionar una estrategia de gestión de riesgos adecuada.

La gestión del mantenimiento está relacionada con el nivel de identificación de los modos de falla, que puede variar según el detalle del análisis del activo. Para desarrollar actividades de mantenimiento efectivas, se debe distinguir el grado de ocurrencia de los distintos modos de falla asociados a las funciones del activo en su contexto operacional actual. Del mismo modo, se requiere identificar las causas raíces de los modos para prevenir fallos funcionales.

Para el proceso de análisis de modos de falla, el equipo de trabajo puede obtener información consultando listas genéricas, al personal de operación y mantenimiento con experiencia en el activo, registros técnicos e históricos, fabricantes y vendedores del activo, así como otros usuarios que hayan interactuado con el mismo.

2.4.3.4.1. Efectos de falla

Se busca identificar los impactos en el contexto operacional cuando se presenta el modo de fallo previamente identificado. Su descripción debe incluir toda la información necesaria para evaluar las repercusiones de los fallos. Por tanto, se menciona cómo se evidencia la falla, si tiene alguna señal física distinguible, y cómo afecta la seguridad, el ambiente, la producción y las operaciones. Esto se registra dividiendo los efectos en cuatro categorías: efecto local, efecto del siguiente nivel superior, efecto final y efecto potencial en el peor de los casos [14].

- Efecto local: Impacto directo en el equipo afectado por la falla.

- Efecto del siguiente nivel superior: Efectos sobre el sistema, considerando la probabilidad de falla, protección de la función (dispositivo de protección) y la secuencia de eventos que siguen a la falla.
- Efecto final: Último resultado que tiene la falla en la seguridad, medio ambiente y cualquier impacto en la producción o capacidad operativa.
- Efecto potencial en el peor de los casos: Impacto sin anticipación, prevención o detección de la falla, y sin considerar los dispositivos de seguridad.

2.4.3.4.2. Consecuencias y riesgos de falla

El último paso del análisis FMECA consta en evaluar la importancia de cada modo de falla, determinando el riesgo inherente que cada uno plantea. Este enfoque permite la gestión proactiva de los riesgos, administrándolos dentro de niveles tolerables, en consonancia con los criterios establecidos por los estándares internacionales según la norma ISO 31000.

El riesgo se define como la combinación del efecto, es decir, la gravedad o consecuencia del evento y la probabilidad de que dicho evento ocurra, guiando las acciones necesarias para mitigar su impacto, ya sea reduciéndolo o eliminándolo por completo. Para lograr este objetivo, se debe dimensionar y categorizar el riesgo cualitativamente, para lo cual, se traza una matriz en la que se examina cada modo de falla.

La probabilidad y la gravedad se clasifican comúnmente en cinco niveles diferentes, expresados descriptivamente y en términos relativos. Por un lado, la probabilidad de ocurrencia se divide en grados que van desde *casi seguro* hasta *raro*, mientras que los tipos de consecuencias abarcan desde un impacto *extremo* a *insignificante*. De manera típica, en el contexto del RCM3, se estudian aspectos relacionados con la salud y seguridad, el medio ambiente, las operaciones con repercusiones en los activos, pérdidas de producción y mantenimiento, operacionales en términos legales y regulatorios, y operacionales considerando su influencia en la comunidad y reputación social [14].

2.4.4. Análisis causa raíz

El análisis causa raíz (ACR) permite identificar las causas subyacentes que contribuyen a un problema o evento no deseado, se aplica principalmente a los modos de fallas. Para ello, se puede emplear la metodología PROACT, que proporciona una guía para abordar de manera eficiente los problemas y oportunidades. Inicia con una recopilación de datos del evento, luego se forma un equipo multidisciplinario que analiza las causas físicas (desgaste, corrosión), humanas (errores de operación, falta de entrenamiento) y latentes del suceso (deficiencias en el diseño, problemas de mantenimiento), empleando técnicas como los cinco porqués, diagrama causa y efecto o el árbol lógico de fallas, seguido por comunicar los hallazgos y recomendaciones en solución al problema. Por último, se implementan esas recomendaciones y se realiza un seguimiento continuo para evaluar los resultados [17].

2.4.4.1. Cinco porqués

Una de las técnicas comúnmente utilizadas en el ACR es la metodología de los cinco porqués. Consiste en hacer preguntas sucesivas sobre el problema, indagando en las causas hasta llegar a la causa raíz. Cada pregunta *por qué* se responde con una respuesta que sirve de base para la siguiente pregunta. El objetivo es descubrir las capas de causas subyacentes hasta encontrar el origen del problema [18].

2.4.4.2. Diagrama ISHIKAWA

El diagrama de Ishikawa, también conocido como diagrama de causa y efecto, es una herramienta gráfica que adopta la forma de una espina de pescado. Esta representación facilita la visualización estructurada de las diversas categorías de posibles causas (espinas) y su relación con el problema principal (cabeza). Las categorías más comunes que se incluyen son personas, métodos, materiales, máquinas, medio ambiente y mediciones [11].

2.4.4.3. Árbol lógico de falla

El árbol lógico de falla se aplica mediante la construcción de un diagrama de árbol que representa todas las causas posibles de una falla principal. En la parte superior se sitúa la falla a evaluar y a medida que se desciende por las ramas, se identifican los modos y causas que podrían provocar dichas fallas, profundizando cada vez más el análisis [19].

2.4.5. Estrategias de mantenimiento

La gestión del mantenimiento se enfoca en desarrollar métodos para mantener y optimizar el rendimiento de equipos y sistemas de una planta durante su ciclo de vida, con el fin de minimizar riegos, tiempos de inactividad y costos de mantenimiento. Existen diversas estrategias para lograr estos objetivos [2].

- Mantenimiento Correctivo o reactivo: Reparar y reemplazar equipamiento después de que ocurre la falla.
- Mantenimiento preventivo: Realizar inspecciones y reemplazos programados de componentes antes de que ocurra la falla.
- Mantenimiento predictivo: Predecir, programar y corregir fallas futuras utilizando el monitoreo continuo de los parámetros de funcionamiento y análisis.
- Mantenimiento proactivo: Prevenir y anticipar fallas identificando y corrigiendo la causa raíz del problema.
- Mantenimiento basado en la condición: Monitoreo continuo de la condición del equipo en tiempo real para detectar fallos inminentes.
- Mantenimiento oportunista: Aprovechar períodos de inactividad de equipos para realizar tareas de mantenimiento, considerando las interacciones entre activos, abordando fallas individuales y colectivas de reacción en cadena.

Últimamente, debido a la implementación de nuevas tecnologías y a los riesgos asociados con las fallas en industrias complejas y avanzadas, el mantenimiento correctivo como tal ha dejado de utilizarse. En su lugar, se emplean técnicas de mantenimiento proactivo y basado en la condición de los equipos [21].

2.5. Ingeniería de la confiabilidad

La ingeniería de la confiabilidad representa una disciplina que se enfoca en la concepción, desarrollo y mantenimiento de sistemas confiables. Su misión primordial radica en asegurar que los sistemas y equipos cumplan rigurosamente con los estándares establecidos de confiabilidad y eficiencia.

Esta especialidad recurre a los indicadores de confiabilidad para evaluar el desempeño y la fiabilidad de los sistemas, permitiendo analizar de forma cuantitativa y cualitativa su comportamiento en diferentes escenarios. De este modo, se logra identificar áreas de mejora y tomar decisiones informadas sobre estrategias de mantenimiento y optimización [19].

2.5.1. Indicadores de confiabilidad

Los indicadores de confiabilidad (RAM) son métricas utilizadas para evaluar y medir el desempeño de los sistemas en términos de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad. Proporcionan información sobre la capacidad de un sistema para funcionar correctamente, estar disponible cuando se requiere y ser fácilmente mantenido.

La confiabilidad R (*Reliability* en inglés), mide la probabilidad de que un sistema o equipo funcione correctamente durante un período específico t y bajo condiciones determinadas. Esta se puede modelar utilizando la distribución de Weibull [22], que entrega mayor flexibilidad en cuanto al comportamiento de falla y equipos. Se rige por los parámetros de escala (α), forma (β) y localización (γ). Igualmente, la confiabilidad se expresa en base a la tasa de falla (λ) y función de densidad de probabilidad de falla (f), de acuerdo a las ecuaciones en 2.3, 2.4 y 2.5.

$$R(t) = \begin{cases} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^\beta} & t \geq \gamma \\ 1 & t < \gamma \end{cases} \quad (2.3)$$

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^\beta} & t \geq \gamma \\ 0 & t < \gamma \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} & t \geq \gamma \\ 0 & t < \gamma \end{cases} \quad (2.5)$$

En los gráficos de la figura 2.4 se muestran las curvas de densidad de probabilidad de falla y confiabilidad para ciertos parámetros de Weibull.

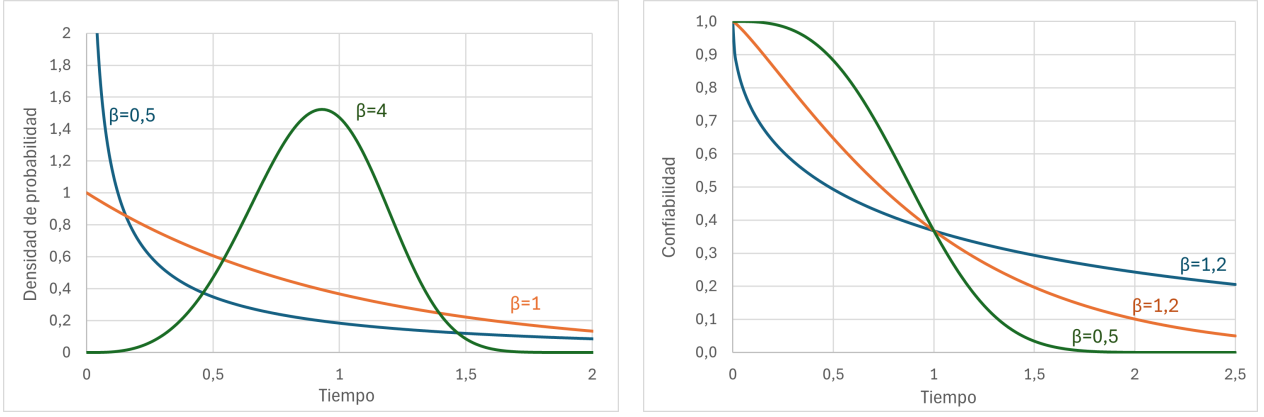


Figura 2.4: Densidad de probabilidad de falla y confiabilidad en distribución de Weibull, con $\alpha = 1$ y $\gamma = 0$. Elaboración propia.

Los parámetros de Weibull se pueden estimar usando Máxima verosimilitud (*MLE* por sus siglas en inglés, *Maximum Likelihood Estimation*), que busca determinar los valores de los parámetros θ que maximizan $L(\theta|x)$. Esto se realiza aplicando logaritmo, siendo \mathbf{x} los datos observados, conforme a las ecuaciones de 2.6. En palabras simples, este método busca los valores de los parámetros que maximizan la probabilidad de los datos observados.

$$L(\theta|x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n f(x_i|\theta) \quad \hat{\theta}_{mle} = \max \left[\sum_{i=1}^n \ln[f(x_i|\theta)] \right] \quad (2.6)$$

Para simplificar la aplicación del método de Estimación de Máxima Verosimilitud (MLE) en Excel, se hace uso de la herramienta Solver. Al indicar los parámetros a ajustar, especificar el valor a maximizar y definir los valores a modificar en función de este objetivo, Solver resuelve de manera eficaz la tarea requerida.

La disponibilidad A (*Availability* en inglés), representa la proporción de tiempo en que un sistema está listo para ser utilizado cuando se le requiere.

De acuerdo con el tecnicismo del rubro, se utilizan cuatro definiciones para la disponibilidad. En el caso del mantenimiento correctivo, se utiliza el concepto de disponibilidad inherente (A_i), que es una forma de estimar el desempeño de los mantenedores, y se calcula considerando el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR) [19]. Donde, T_o corresponde al tiempo de operación, T_r al tiempo de reparación, N al número de fallas y M al número de reparaciones, de acuerdo a lo expresado en 2.7.

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad MTBF = \frac{T_o}{N} \quad MTTR = \frac{T_r}{M} \quad (2.7)$$

Cabe mencionar que la disponibilidad inherente es sensible al intervalo y a la calidad de los mantenimientos preventivos, aunque, solo los considera a través de su efecto en el tiempo medio entre fallas, pero no considera que tal logro toma lo que duren las intervenciones

preventivas. Por ello, otra manera de medir el desempeño de los mantenedores es mediante la disponibilidad de mantenimiento (A_m). En la misma línea, se define la disponibilidad operacional (A_o) y de partes o *supply* (A_s). Para efectos de cálculo, si A_s es alta, entonces conviene aproximar $A_o = A_m \cdot A_s$. De acuerdo con la ISO 14224 [23], las expresiones de las disponibilidades nombradas se muestran en las ecuaciones 2.8 y 2.9.

$$A_m = \frac{MTBI}{MTBI + MTTR + MPMT} \quad A_o = \frac{MTBI}{MTBI + MDT} \quad (2.8)$$

$$A_s = \frac{MTBM}{MTBM + MSD} \quad MDT = MCMT + MPMT + MSD \quad (2.9)$$

Donde MTBI es el tiempo medio entre intervenciones (correctivas o preventivas), MPMT duración media de las intervenciones preventivas, MDT el tiempo medio fuera de servicio (tiempo que dura intervención de mantenimiento, repuestos), MTBM el tiempo medio entre mantenimientos y MSD el tiempo medio de espera por repuestos.

Contrariamente, la indisponibilidad I , es el tiempo en que un sistema no se encuentra operativo, expresado por 2.10.

$$I = 1 - A \quad (2.10)$$

La mantenibilidad M (*Maintainability* en inglés), evalúa la capacidad de un sistema o equipo para ser reparado o mantenido en un tiempo y costo razonables [19]. Donde t es tiempo de reparación y f la función de densidad de probabilidad, representado según 2.11.

$$M(t) = \int_0^t f(t)dt \quad M = \frac{MTTR}{MTBF + MTTR} \quad (2.11)$$

La estimación de la mantenibilidad se puede realizar utilizando la ecuación de distribución logarítmica normal (2.12), que se ajusta a la mayoría de los casos y captura la naturaleza asimétrica de los tiempos de reparación en mantenimiento, valores positivos que varían ampliamente. Donde μ es el promedio logarítmico y σ la desviación estándar logarítmica. Alternativamente, si los datos no se ajustan a la distribución logarítmica normal, se puede considerar el uso de la distribución de Weibull.

$$f(t) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(t) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad t > 0 \quad (2.12)$$

Por otro lado, a fin de evaluar el impacto económico de los equipos o sistemas, se emplea la métrica del costo global de mantenimiento 2.13. Este involucra los costos de intervenciones (C_i : Recurso humano, material, repuestos), costos de fallas (C_f : Pérdidas de ingreso), costos de almacenamiento (C_a : Inventarios) y los costos de sobre-inversiones (C_{si} : Inversión inicial mayor) [12].

$$C_g = C_i + C_f + C_a + C_{si} \quad (2.13)$$

Si se descartan los costos de almacenamiento y sobre-inversiones, el costo global de mantenimiento por unidad de tiempo bajo condiciones de actividades correctivas, preventivas, inspecciones y otras detenciones se expresa según la ecuación 2.14.

$$C_g = \sum_{j=1}^n (C_{ij} + (C_{fj} \cdot \alpha)) f_j \cdot TFS_j = \sum_{j=1}^n C_{gej} D_j \quad (2.14)$$

Donde α corresponde al factor de falla de acuerdo al grado de planificación y efecto en producción, con 0 para casos planificados con mínimo impacto en producción y 1 en caso contrario. f_j representa la frecuencia de falla, TFS_j el tiempo fuera de servicio del ciclo logístico completo, C_{gej} el costo global específico y D_j a la indisponibilidad.

2.5.2. Balanced Scorecard

El Balanced Scorecard (BSC) o cuadro de mando integral, es una herramienta de gestión y planificación estratégica que permite a las organizaciones convertir su misión y estrategia en objetivos e indicadores de rendimiento. Estos se estructuran en una tabla organizada en torno a cuatro perspectivas equilibradas, definiendo sus objetivos estratégicos, indicadores de desempeño, metas y planes de acción [20].

1. Perspectiva financiera: Se refiere a los resultados económicos y financieros que desea lograr la organización.
2. Perspectiva del cliente: Se enfoca en la satisfacción y atributos de desempeño valorados por el cliente.
3. Perspectiva de procesos internos: Se centra en los medios a corto y largo plazo para alcanzar los objetivos financieros y del cliente.
4. Perspectiva de aprendizaje y crecimiento: Se relaciona con la capacidad de la organización para innovar, mejorar, aprender y crear valor.

En el contexto de la ingeniería de la confiabilidad y la metodología RCM, el BSC se utiliza para establecer objetivos y metas claras a nivel organizacional, asegurando que las estrategias de mantenimiento de RCM se alineen con dichos objetivos. Esto es especialmente relevante en términos de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, así como en la reducción de costos operacionales y de mantenimiento.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Estructura

Con el fin de alcanzar los objetivos establecidos en el presente informe, se hace imperante la adopción de una metodología de trabajo específica y estructurada.

1. Revisión bibliográfica y de antecedentes:

Se investigan diversas fuentes de información, abarcando metodologías, procedimientos, estrategias y herramientas aplicables al análisis. Esta investigación se basa en una revisión bibliográfica de estudios similares, así como en la revisión de documentos y antecedentes relacionados con la planta de flotación de escoria, sus sistemas, procesos, equipos, fallas, entre otros aspectos relevantes.

2. Análisis de criticidad de equipos utilizando Matriz de Riesgo y Jack Knife:

Para evaluar el estado crítico de los sistemas de la planta, en primer lugar, se debe realizar un análisis de criticidad con Matriz de Riesgo, valorizando y categorizando los riesgos asociados a cada equipo y sistema que lo compone. Posteriormente, se emplea el método Jack Knife con el fin de acotar la priorización de equipos, comparando resultados con la Matriz y así fundamentar la posterior selección del sistema crítico.

3. Levantamiento de situación actual de los equipos críticos:

Consiste en realizar un estudio de la operación y mantenimiento vigente de los equipos críticos con el objetivo de obtener un diagnóstico inicial e identificar áreas de mejora, a través de un análisis que abarque la confiabilidad mediante los indicadores RAM.

4. Selección del sistema crítico a evaluar:

De acuerdo al nivel de criticidad de los equipos y sistemas, se debe examinar la correlación de los análisis para así converger hacia un sistema crítico en específico a optimizar.

5. Desarrollo del contexto operacional:

Se define el contexto operacional consistente en describir la operación de los sistemas, equipos, procesos, apoyándose en un diagrama entrada proceso salida (EPS). Asimismo

contempla componentes, dispositivos, parámetros de calidad, mantenimiento, turnos, entre otros aspectos.

6. Análisis de modos y efectos de falla mediante FMECA:

Basándose en los resultados de los procedimientos anteriores, se procede a identificar y evaluar los posibles modos de falla del sistema, equipo o componente. Se analizan estos modos de falla potenciales, sus causas, efectos y consecuencias. Cada modo de falla será calificado en términos de severidad, ocurrencia y detección para determinar el nivel de riesgo correspondiente.

7. Aplicación de análisis causa raíz a modos de falla críticos:

Considerando los modos de falla críticos, se analizan las causas fundamentales o raíz que los originan, esto mediante la metodología PROACT que incluye la estrategia de los cinco porqués, árbol de falla y el diagrama causa efecto, también llamado diagrama ISHIKAWA.

8. Selección de estrategias de mantenimiento:

Se definen procedimientos de mantenimiento al sistema crítico que minimicen las consecuencias de las fallas mediante un árbol lógico de decisión, considerando los recursos disponibles, las regulaciones y estándares aplicables, así como las prácticas recomendadas en la industria.

9. Desarrollo de estrategias y seguimiento:

Para las tareas seleccionadas, se deben establecer intervalos de tiempo y condiciones para la ejecución de cada actividad, asignando recursos y responsabilidades al equipo de trabajo. Además, se especifica un sistema de seguimiento para garantizar que se practique una correcta ejecución.

10. Cálculo y proyección de indicadores RAM:

Con el propósito de medir la eficiencia y efectividad del plan de mantenimiento para el sistema seleccionado, se utilizan los indicadores RAM, confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, estudiando sus resultados previa y posteriormente a la implementación de RCM mediante una proyección de resultados.

3.2. Recursos

Para el desarrollo del estudio propuesto, solo se requieren recursos no pecuniarios. Dentro de ellos, se utilizan las herramientas de análisis mencionadas, Matriz de riesgo, Jack Knife, FMECA, PROACT, cinco porqués, causa-efecto e indicadores RAM, junto con los archivos en formato Excel extraídos del software de gestión de activos, SAP. Asimismo se precisa del apoyo del personal en planta, que facilite el acceso a los antecedentes oficiales de la planta, principalmente de información técnica de equipos, componentes y bases de datos.

Capítulo 4

Aplicación de la metodología RCM3

4.1. Análisis de criticidad

Se lleva a cabo un estudio detallado del impacto de los equipos presentes en la planta de flotación mediante el empleo de la matriz de riesgo, evaluando las condiciones de acuerdo con criterios específicos, que son determinados según el proceso en cuestión. Como punto de partida para este análisis, es necesario emplear la frecuencia de falla de los equipos, utilizando los registros de eventos de falla de la planta. Se dispone de datos correspondientes a los años 2019, 2020, 2021, 2022 y 2023, que deben ser utilizados como base de trabajo. Dado que el enfoque principal de este trabajo radica en la metodología RCM de tercera generación, que concede la máxima importancia a los riesgos en seguridad humana y ambiental, se selecciona esta área como criterio de revisión. Dada la relevancia económica para la empresa, los costos asociados tanto al mantenimiento como a las pérdidas de producción derivadas de las fallas adquieren significado. Adicionalmente, la optimización y los indicadores de confiabilidad están vinculados a la flexibilidad operacional de los equipos, convirtiéndose en otro criterio a evaluar.

Una herramienta adicional para el estudio de criticidad es el análisis jerárquico (AHP), que evalúa la severidad de los equipos bajo criterios ponderados. Dado que estos factores guardan relación directa con aquellos que se estudian en la matriz de riesgo, se opta por combinar ambos métodos. De este modo, se definen los criterios y sus pesos relativos, tales como en la tabla 4.1. Si bien no se emplea un enfoque matemático para fundamentar los pesos relativos, estos se determinan en función de la importancia atribuida por la metodología RCM. Se otorga mayor relevancia al impacto en seguridad y ambiente (0,5), dado que las consecuencias críticas de una falla afectan directamente a los trabajadores, el entorno y la reputación de la empresa, tanto social como regulatoriamente. A continuación, se considera el impacto en la producción (0,3), que conlleva grandes pérdidas económicas para la corporación, aunque no tiene la misma relevancia que el criterio anterior. Por otro lado, el costo de mantenimiento y la flexibilidad operacional se ponderan de manera equitativa, ya que las consecuencias directas en estos ámbitos no implican pérdidas económicas ni riesgos graves para la compañía (0,1).

Tabla 4.1: Criterios de evaluación para el análisis de criticidad. Elaboración propia.

CRITERIOS DE EVALUACIÓN	PESOS	DESCRIPCIÓN
Frecuencia de falla (FF)	1	La frecuencia y gravedad de las fallas anteriores del equipo
Impacto en la seguridad y ambiente (SHA)	0,5	El equipo tiene el potencial de causar daños significativos al medio ambiente y/o seguridad de los trabajadores en caso de fallo
Impacto en la producción (PR)	0,3	El equipo tiene un impacto significativo en la capacidad de producción de la planta
Costo de mantenimiento (CM)	0,1	El costo asociado al mantenimiento, adquisición de piezas de repuesto para el equipo, mano de obra, entre otros.
Flexibilidad operacional (FO)	0,1	Grado en que un equipo puede soportar y recuperarse de interrupciones o eventos adversos en términos de mantenimiento, redundancia , entre otros.

Considerando los criterios mencionados, se procede a recopilar la información pertinente, iniciando con un análisis detallado de las frecuencias de falla. Para llevar a cabo este análisis, se utiliza la información contenida en los registros históricos de fallas, la que se organiza y clasifica en función de los equipos afectados. Dada la desorganización de la información sobre los equipos, que incluían los registros con nombres y códigos diferentes para los mismos, se alineó la información con los diagramas de proceso e instrumentación de la planta (P&ID). De esta forma, se logra una clasificación de los datos de manera coherente, evitando redundancias, estableciendo una correlación e identificación precisa de equipos y fallas.

Una vez completada la clasificación de los eventos, utilizando Excel, se realiza un recuento detallado del número de fallas asociadas a cada equipo, permitiendo así la determinación de tasas de falla anuales, el tiempo empleado en la reparación de las fallas por equipo, el tiempo promedio entre fallas, el tiempo medio de reparación y la indisponibilidad, según se indica en la sección 2.5.1. Los resultados de estos cálculos se integran en la tabla de la figura 4.1.

EQUIPO	NÚMERO DE FALLAS						FRECUENCIA DE FALLA (F/AÑO)	TIEMPO TOTAL REPARACIÓN (HORAS)	MTBF (AÑOS)	MTTR (AÑOS)	INDISPONIBILIDAD
	2019	2020	2021	2022	2023	TOTAL					
Alimentador de placas	9	30	37	7	20	103	21,197	481,00	0,047	0,00053	1,130%
Batería de hidrociclones BHC	0	8	5	0	1	14	2,852	51,73	0,351	0,00042	0,120%
Bombas agua de sello	0	0	2	1	0	3	0,611	5,80	1,638	0,00022	0,013%
Bombas agua procesos	3	0	1	1	3	8	1,629	19,17	0,614	0,00027	0,045%
Bombas cajon molienda	23	9	4	23	8	67	13,706	225,28	0,073	0,00038	0,526%
Bombas esp concentrado	3	0	0	1	0	4	0,814	17,70	1,228	0,00051	0,041%
Bombas esp relaves	1	2	0	0	2	5	1,019	75,50	0,981	0,00172	0,176%
Bombas rebose Esp.	1	0	1	0	1	3	0,611	29,13	1,637	0,00111	0,068%
Bombas TK concentrado	3	0	0	1	0	4	0,815	30,65	1,228	0,00087	0,071%
Bombas TK relaves	1	1	0	1	0	3	0,611	20,65	1,637	0,00079	0,048%
Cajón de Molienda	0	3	3	3	0	9	1,832	23,18	0,546	0,00029	0,054%
Celdas flotación	8	2	0	0	2	12	2,445	46,33	0,409	0,00044	0,108%
Chute descarga M. SAG	0	0	1	0	1	2	0,407	2,17	2,457	0,00012	0,005%
Chute Escalera 2421	7	5	54	29	14	109	22,209	54,83	0,045	0,00006	0,128%
Chute movil M. SAG	1	0	1	0	0	2	0,407	2,48	2,457	0,00014	0,006%
Chute Traspaso CV 2421	3	0	0	1	0	4	0,814	6,97	1,228	0,00020	0,016%
Compresores	3	0	8	1	3	15	3,055	30,45	0,327	0,00023	0,071%
Correa 2421	27	20	9	6	20	82	16,826	356,02	0,059	0,00050	0,834%
Correa 3207	7	6	15	5	2	35	7,134	69,37	0,140	0,00023	0,161%
Correa 3213	0	0	1	0	0	1	0,204	2,08	4,914	0,00024	0,005%
Correa 3214	0	1	0	0	0	1	0,203	0,82	4,914	0,00009	0,002%
Correa 3215	1	0	0	0	1	2	0,407	16,80	2,456	0,00096	0,039%
Correa 4004	4	0	0	0	0	4	0,814	15,57	1,228	0,00044	0,036%
Espesador Concentrado	11	5	7	1	7	31	6,332	159,03	0,158	0,00059	0,371%
Espesador de Relaves	3	7	6	0	0	16	3,273	224,03	0,306	0,00160	0,523%
Filtro PF	11	12	14	39	8	84	17,471	929,43	0,057	0,00126	2,207%
Filtros cerámicos	6	2	1	13	1	23	4,694	125,75	0,213	0,00062	0,293%
Molino de Bolas	6	25	21	28	21	101	21,443	1786,07	0,047	0,00202	4,329%
Molino SAG	32	33	43	20	16	144	29,733	621,90	0,034	0,00049	1,466%
Piping agua de procesos	0	0	2	0	0	2	0,407	3,13	2,457	0,00018	0,007%
Piping agua de sello	0	1	2	0	0	3	0,611	18,58	1,637	0,00071	0,043%
Piping agua industrial	0	1	0	0	0	1	0,203	0,25	4,914	0,00003	0,001%
Piping aire instr.	0	1	0	0	0	1	0,204	4,68	4,914	0,00053	0,011%
Rectificador 4	0	0	0	1	0	1	0,204	8,33	4,913	0,00095	0,019%
Sopladores	8	4	1	1	6	20	4,076	62,93	0,245	0,00036	0,146%
TK agua procesos	0	3	0	0	0	3	0,611	14,63	1,637	0,00056	0,034%
TK agua Sello	0	0	1	0	0	1	0,204	3,07	4,914	0,00035	0,007%
TK de concentrado	1	3	4	0	2	10	2,038	55,28	0,491	0,00063	0,129%
TK de rebose espesador	2	1	1	0	0	4	0,816	84,05	1,226	0,00240	0,196%
TK recirculacion overflow	0	0	0	0	1	1	0,204	17,20	4,912	0,00196	0,040%
Tolva	0	1	5	0	0	6	1,221	1,77	0,819	0,00003	0,004%

Figura 4.1: Tabla de las frecuencias de falla para cada equipo. Elaboración propia.

Por otra parte, se solicitó la información correspondiente a la producción de la planta de flotación de escoria durante los años que guardan relación con el registro de fallas (véase la tabla de la figura 4.2). A partir de estos datos, se logró determinar la pérdida de producción en toneladas métricas secas (TMS) atribuible a cada equipo en caso de fallo dado su tiempo de inactividad en horas (figura 4.3). Además, se recopiló información detallada sobre los costos asociados al mantenimiento, limitados únicamente a las actividades de compra, cambios, instalación y reparación, sin incluir los costos de lucro cesante (pérdida por inactividad). Estos costos se relacionaron con los períodos de fallo de cada equipo en los años correspondientes, como se ilustra en la tabla de la figura 4.4.

	2019	2020	2021	2022	2023	TOTAL
PRODUCCIÓN [TMS]	36674	74035	81117	44235	38257	274318
DÍAS PRODUCIDOS	175	297	308	215	147	1142

Figura 4.2: Producción de concentrado de cobre de la planta de flotación de escoria. Elaboración propia.

EQUIPO	TIEMPO INACTIVO (H)					
	2019	2020	2021	2022	2023	TOTAL
Alimentador de placas	168,90	68,05	74,97	9,85	159,23	481,00
Batería de hidrociclones BHC	0,00	26,52	15,37	0,00	9,85	51,73
Bombas agua de sello	0,00	0,00	5,80	0,10	0,00	5,90
Bombas agua procesos	13,08	0,00	5,33	0,10	0,75	19,27
Bombas cajon molienda	44,00	4,25	2,88	134,50	39,65	225,28
Bombas esp concentrado	16,87	0,00	0,00	0,10	0,00	16,97
Bombas esp relaves	58,47	16,77	0,00	0,00	0,27	75,50
Bombas rebose Esp.	13,98	0,00	14,07	0,00	1,08	29,13
Bombas TK concentrado	26,85	0,00	0,00	2,47	0,00	29,32
Bombas TK relaves	6,13	3,02	0,00	11,50	0,00	20,65
Cajón de Molienda	0,00	8,43	3,17	11,58	0,00	23,18
Celdas flotación	8,20	1,57	0,00	0,00	32,48	42,25
Chute descarga M. SAG	0,00	0,00	1,93	0,00	0,23	2,17
Chute Escalera 2421	8,82	7,38	24,18	9,27	5,18	54,83
Chute movil M. SAG	0,67	0,00	1,82	0,00	0,00	2,48
Chute Traspaso CV 2421	3,87	0,00	0,00	3,10	0,00	6,97
Compresores	0,68	0,00	20,18	0,25	9,33	30,45
Correa 2421	85,13	9,20	7,75	223,02	30,70	355,80
Correa 3207	49,55	7,67	5,42	1,87	4,87	69,37
Correa 3213	0,00	0,00	2,08	0,00	0,00	2,08
Correa 3214	0,00	0,82	0,00	0,00	0,00	0,82
Correa 3215	5,87	0,00	0,00	0,00	10,93	16,80
Correa 4004	15,57	0,00	0,00	0,00	0,00	15,57
Espesador Concentrado	68,75	13,22	36,22	8,25	32,60	159,03
Espesador de Relaves	91,75	54,73	77,55	0,00	0,00	224,03
Filtro PF	191,28	67,67	123,35	542,52	34,00	958,82
Filtros cerámicos	71,02	9,95	7,53	40,78	3,93	133,22
Molino de Bolas	23,18	1376,97	223,83	133,00	40,67	1797,65
Molino SAG	111,63	240,72	112,87	136,05	32,22	633,48
Piping agua de procesos	0,00	0,00	3,13	0,00	0,00	3,13
Piping agua de sello	0,00	13,20	5,38	0,00	0,00	18,58
Piping agua industrial	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,25
Piping aire instr.	0,00	4,68	0,00	0,00	0,00	4,68
Rectificador 4	0,00	0,00	0,00	8,33	0,00	8,33
Sopladores	28,38	16,42	1,25	0,90	15,98	62,93
TK agua procesos	0,00	14,63	0,00	0,00	0,00	14,63
TK agua Sello	0,00	0,00	3,07	0,00	0,00	3,07
TK de concentrado	17,03	10,10	18,08	0,00	10,07	55,28
TK de rebose espesador	71,37	6,92	5,77	0,00	0,00	84,05
TK recirculacion overflow	0,00	0,00	0,00	0,00	17,20	17,20
Tolva	0,00	0,42	1,35	0,00	0,00	1,77

Figura 4.3: Tiempos de inactividad debido a los eventos de falla de la planta de flotación de escoria. Elaboración propia.

EQUIPO	PÉRDIDA DE PRODUCCIÓN [TMS]						% PÉRDIDA	COSTO MANTENIMIENTO [MILL USD]	
	2019	2020	2021	2022	2023	TOTAL		TOTAL	ANUAL
Alimentador de placas	1474,83	706,55	823,55	84,44	1726,68	4816,05	1,76%	0,376	0,0764
Batería de hidrociclones BHC	0,00	275,32	168,81	0,00	106,81	550,94	0,20%	0,519	0,1055
Bombas agua de sello	0,00	0,00	63,72	0,86	0,00	64,57	0,02%	0,615	0,1251
Bombas agua procesos	114,24	0,00	58,59	0,86	8,13	181,82	0,07%	0,956	0,1945
Bombas cajon molienda	384,21	44,13	31,67	1153,01	429,95	2042,97	0,74%	1,343	0,2734
Bombas esp concentrado	147,28	0,00	0,00	0,86	0,00	148,14	0,05%	0,430	0,0875
Bombas esp relaves	510,53	174,09	0,00	0,00	2,89	687,51	0,25%	0,416	0,0847
Bombas rebose Esp.	122,10	0,00	154,53	0,00	11,75	288,38	0,11%	0,230	0,0467
Bombas TK concentrado	234,45	0,00	0,00	21,15	0,00	255,60	0,09%	0,453	0,0922
Bombas TK relaves	53,56	31,32	0,00	98,58	0,00	183,46	0,07%	0,115	0,0235
Cajón de Molienda	0,00	87,56	34,79	99,30	0,00	221,65	0,08%	0,275	0,0561
Celdas flotación	71,60	16,27	0,00	0,00	352,24	440,11	0,16%	0,537	0,1093
Chute descarga M. SAG	0,00	0,00	21,24	0,00	2,53	23,77	0,01%	0,001	0,0002
Chute Escalera 2421	76,99	76,66	265,67	79,44	56,21	554,96	0,20%	0,256	0,0520
Chute movil M. SAG	5,82	0,00	19,96	0,00	0,00	25,78	0,01%	0,265	0,0539
Chute Traspaso CV 2421	33,76	0,00	0,00	26,58	0,00	60,34	0,02%	0,316	0,0643
Compresores	5,97	0,00	221,72	2,14	101,21	331,04	0,12%	0,036	0,0073
Correa 2421	743,38	95,52	85,14	1911,83	332,90	3168,77	1,16%	0,660	0,1343
Correa 3207	432,67	79,60	59,50	16,00	52,77	640,55	0,23%	0,642	0,1306
Correa 3213	0,00	0,00	22,89	0,00	0,00	22,89	0,01%	0,236	0,0481
Correa 3214	0,00	8,48	0,00	0,00	0,00	8,48	0,00%	0,249	0,0506
Correa 3215	51,23	0,00	0,00	0,00	118,56	169,79	0,06%	0,312	0,0636
Correa 4004	135,93	0,00	0,00	0,00	0,00	135,93	0,05%	0,778	0,1584
Espesador Concentrado	600,32	137,23	397,86	70,72	353,50	1559,64	0,57%	0,650	0,1322
Espesador de Relaves	801,16	568,29	851,93	0,00	0,00	2221,38	0,81%	0,790	0,1607
Filtro PF	1670,28	702,57	1355,07	4650,77	368,69	8747,38	3,19%	2,051	0,4174
Filtros cerámicos	620,12	103,31	82,76	349,62	42,65	1198,45	0,44%	2,399	0,4882
Molino de Bolas	202,44	14296,86	2458,93	1140,15	440,98	18539,35	6,76%	2,023	0,4117
Molino SAG	974,78	2499,33	1239,90	1166,30	349,35	6229,66	2,27%	2,479	0,5045
Piping agua de procesos	0,00	0,00	34,42	0,00	0,00	34,42	0,01%	0,405	0,0825
Piping agua de sello	0,00	137,05	59,14	0,00	0,00	196,19	0,07%	0,013	0,0027
Piping agua industrial	0,00	2,60	0,00	0,00	0,00	2,60	0,00%	0,069	0,0140
Piping aire instr.	0,00	48,63	0,00	0,00	0,00	48,63	0,02%	0,046	0,0093
Rectificador 4	0,00	0,00	0,00	71,44	0,00	71,44	0,03%	0,003	0,0006
Sopladores	247,84	170,45	13,73	7,72	173,32	613,06	0,22%	0,170	0,0346
TK agua procesos	0,00	151,94	0,00	0,00	0,00	151,94	0,06%	0,025	0,0050
TK agua Sello	0,00	0,00	33,69	0,00	0,00	33,69	0,01%	0,009	0,0018
TK de concentrado	148,73	104,87	198,66	0,00	109,16	561,42	0,20%	0,092	0,0186
TK de rebose espesador	623,17	71,81	63,35	0,00	0,00	758,34	0,28%	0,030	0,0060
TK recirculacion overflow	0,00	0,00	0,00	0,00	186,51	186,51	0,07%	0,064	0,0130
Tolva	0,00	4,33	14,83	0,00	0,00	19,16	0,01%	0,003	0,0007

Figura 4.4: Pérdida de producción y costos de mantenimiento debido a los eventos de falla de la planta de flotación de escoria. Elaboración propia.

En lo que respecta a la probabilidad de falla, se llevó a cabo una discretización en rangos de probabilidad, establecidos de acuerdo con la varibilidad de la tasa de falla calculada. Estos rangos abarcan desde un nivel muy bajo hasta uno muy alto, denotados por valores de 1 a 5 respectivamente, como se detalla en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Clasificación del riesgo según la probabilidad de falla. Elaboración propia.

Probabilidad de falla	Categoría	P
Es probable que el equipo falle mayor a 10 fallos/año	Muy alto	5
Es probable que el equipo falle entre 6 - 10 fallos/año	Alto	4
Es probable que el equipo falle entre 3 - 6 fallos/año	Medio	3
Es probable que el equipo falle entre 1-3 fallos/año	Bajo	2
Es probable que el equipo falle menor a 1 fallo/año	Muy bajo	1

El análisis del impacto en la seguridad humana y el medioambiente se lleva a cabo conforme a la clasificación establecida en la tabla 4.3, utilizando una escala de 1 a 5 para calificar la severidad del impacto en caso de falla. Este análisis considera diversos factores, como las características de los flujos, el material contenido, las presiones, temperaturas, toxicidad, velocidades y las particularidades asociadas a los modos de falla de los equipos registrados.

En el contexto de los riesgos para las personas, se evaluaron aspectos como la exposición y los riesgos de quemaduras por productos químicos como el ácido nítrico utilizado en los filtros cerámicos, los floculantes empleados en los espesadores, el espumante Flotanol H70 y los colectores Hostafлот utilizados en la etapa de flotación. Asimismo, se consideró el riesgo de atrapamiento por contacto con equipos móviles, como vehículos, correas transportadoras, molinos, poleas, filtros, entre otros.

La categorización de los niveles de riesgo incorpora los términos de gravedad y reversibilidad, brindando así un marco completo para la evaluación y gestión de los riesgos identificados.

Tabla 4.3: Clasificación del riesgo según el impacto en seguridad humana y ambiental. Elaboración propia.

Impacto seguridad humana y medioambiente	Categoría	Valor
Afecta la seguridad humana o corresponde a una falla catastrófica que provoca daños medioambientales irreversibles tanto interna como externamente	Muy alto	5
Daños muy graves que dejan secuela después de tratamiento o reparación y/o provoca daños medioambientales irreversibles internamente	Alto	4
Daños graves que desaparecen después de tratamiento o reparación y/o provoca daños medioambientales cuyos efectos no violan las normas	Medio	3
Daños leves que desaparecen después de tratamiento o reparación y/o daños medioambientales reversibles	Bajo	2
No provoca ningún daño a personas, instalaciones o al ambiente	Muy bajo	1

Para el impacto en la producción se evalúa la pérdida asociada a períodos de inactividad de los activos, que debido a su severidad, requieren detener la planta para su reparación, resultando en una interrupción de la producción. Esta pérdida se expresa en porcentajes y se clasifica en una escala de riesgo del 1 al 5, representado en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Clasificación del riesgo según el impacto en la producción. Elaboración propia.

Impacto en la producción	Categoría	Valor
Pérdida de Producción mayor a 3%	Muy alto	5
Pérdida de Producción entre 2 y 3%	Alto	4
Pérdida de Producción entre 1 y 2%	Medio	3
Pérdida de Producción entre 0,5 y 1%	Bajo	2
Pérdida de Producción menor a 0,5%	Muy bajo	1

Los costos de mantenimiento se distribuyen en rangos específicos, numerados del 1 al 5, que abarcan desde costos inferiores a 1000 dólares hasta costos superiores a 200000 dólares, según se detalla en la tabla 4.5. Estos rangos se definen considerando la variabilidad y magnitud de los costos históricos de mantenimiento en la planta, permitiendo una categorización clara de la criticidad, facilitando la priorización y toma de decisiones, identificando los equipos que requieren atención urgente debido a sus altos costos de mantenimiento.

Tabla 4.5: Clasificación del riesgo según los costos de mantenimiento. Elaboración propia.

Costos de mantenimiento	Categoría	Valor
Costo de mantenimiento mayor a 200000 USD	Muy alto	5
Costo de mantenimiento entre 100000 y 199999 USD	Alto	4
Costo de mantenimiento entre 50000 y 99999 USD	Medio	3
Costo de mantenimiento entre 1000 y 49999 USD	Bajo	2
Costo de mantenimiento menor a 1000 USD	Muy bajo	1

La flexibilidad operacional de los equipos se evalúa con valores de 1, 3 y 5, como se muestra en la tabla 4.6. Esta condición se basa en la presencia de equipos o sistemas de respaldo como función de repuesto en caso de falla, la disponibilidad de un stock de repuestos para el equipo, o la ausencia de ambos elementos.

Tabla 4.6: Clasificación del riesgo según la flexibilidad operacional. Elaboración propia.

Flexibilidad operacional	Categoría	Valor
No existe opción de servicio y no hay función de repuesto	Alto	5
Hay opción de repuesto compartido	Medio	3
Función de repuesto disponible	Bajo	1

Conforme a los niveles de severidad previamente establecidos para cada criterio, se procede a elaborar la matriz de riesgos 4.7, que define los niveles de criticidad asociados al equipo evaluado. Esto se determina en función del impacto o consecuencia, según la ecuación 2.1. La matriz se configura como una representación cruzada entre la probabilidad de ocurrencia de fallos y el impacto resultante de los mismos. La tabla 4.8 detalla los niveles de riesgo vinculados a los números de la matriz.

Tabla 4.7: Matriz de riesgo. Elaboración propia.

Probabilidad	5	1	2	3	3	3
	4	1	2	2	3	3
	3	0	1	2	2	3
	2	0	1	1	2	2
	1	0	0	0	1	1
		1 a 1,8	1,81 a 2,6	2,61 a 3,4	3,41 a 4,2	4,21 a 5
		Impacto				

Tabla 4.8: Nivel de riesgo o criticidad. Elaboración propia.

Criticidad	
Alta	3
Mediana	2
Baja	1
No crítico	0

En base a lo anteriormente expuesto, se ha elaborado una tabla (ver figura 4.5), donde se determinan los niveles de riesgo para cada equipo de la planta, de acuerdo con los rangos establecidos de los criterios en estudio. En virtud de este procedimiento, se logró evaluar el impacto y, por ende, el riesgo asociado a cada equipo. Los resultados revelaron siete equipos con nivel crítico, identificado como el nivel 3 en la matriz de riesgos.

No obstante, dada la ponderación relativa atribuida por el análisis jerárquico, estos siete equipos han sido ordenados de manera descendente según el valor resultante del impacto, lo que permite discernir con mayor precisión cuáles de estos equipos connotan riesgos más significativos para el proceso empresarial. En la tabla 4.9, se destaca que tanto el Molino de bolas como el Molino SAG presentan el impacto más elevado. Esto debido a sus altas frecuencias de falla, alto impacto en la seguridad y ambiente, así como un elevado costo de mantenimiento e impacto en producción.

N°	ÁREA	EQUIPO	TAG	FF	SHA	PR	CM	FO	IMPACTO	RIESGO
1	2400	Alimentador de placas	2400-FE-2411	5	4	3	3	3	3,50	3
2	3200	Batería de hidrociclones BHC	3200-CS-3251	2	5	1	4	3	3,50	2
3	3200	Bombas agua de sello	3100-PP-3109/3110	1	3	1	4	3	2,50	0
4	3100	Bombas agua procesos	3100-PP-3101/3102/3103	2	3	1	4	3	2,50	1
5	3200	Bombas cajon molienda	3200-PP-3231/3232	5	4	2	5	3	3,40	3
6	3400	Bombas esp concentrado	3400-PP-3402/3403	1	3	1	3	1	2,20	0
7	3400	Bombas esp relaves	3400-PP-3412/3413	2	3	1	3	1	2,20	1
8	3400	Bombas rebose esp.	3400-PP-3422/3423	1	3	1	2	1	2,10	0
9	3400	Bombas TK concentrado	3400-PP-3405/3406	1	3	1	3	3	2,40	0
10	3400	Bombas TK relaves	3400-PP-3415/3416	1	3	1	2	1	2,10	0
11	3200	Cajón de Molienda	3200-BN-3231	2	3	1	3	3	2,40	1
12	3300	Celdas flotación	3300-CF-3311/3325	2	5	1	4	1	3,30	1
13	3200	Chute descarga M. SAG	3200-CH-3210	1	3	1	1	3	2,20	0
14	2400	Chute Escalera 2421	2400-CH-2421	5	3	1	3	3	2,40	2
15	3200	Chute movil M. SAG	3200-CH-3201	1	4	1	3	3	2,90	0
16	2400	Chute Traspaso CV 2421	2400-CH-2411	1	3	1	3	3	2,40	0
17	3300	Compresores		3	4	1	2	3	2,80	2
18	2400	Correa 2421	2400-CV-2421	5	4	3	4	3	3,60	3
19	3200	Correa 3207	3200-CV-3207	4	4	1	4	3	3,00	2
20	3200	Correa 3213	3200-CV-3213	1	4	1	2	3	2,80	0
21	3200	Correa 3214	3200-CV-3214	1	4	1	3	3	2,90	0
22	3200	Correa 3215	3200-CV-3215	1	4	1	3	3	2,90	0
23	4000	Correa 4004	3200-CV-4004	1	4	1	4	3	3,00	0
24	3400	Espesador Concentrado	3400-EP-3401	4	5	2	4	3	3,80	3
25	3400	Espesador de Relaves	3400-EP-3411	3	5	2	4	3	3,80	2
26	3500	Filtro PF	3500-FI-3501	5	3	5	5	3	3,80	3
27	3500	Filtros cerámicos	3500-FL-3541/3542	3	5	1	5	1	3,40	2
28	3200	Molino de Bolas	3200-ML-3221	5	5	5	5	3	4,80	3
29	3200	Molino SAG	3200-ML-3201	5	5	4	5	3	4,50	3
30	3200	Piping agua de procesos		1	4	1	3	3	2,90	0
31	3100	Piping agua de sello		1	2	1	2	3	1,80	0
32	3100	Piping agua industrial		1	3	1	2	3	2,30	0
33	3100	Piping aire instr.		1	2	1	2	3	1,80	0
34		Rectificador 4		1	4	1	1	3	2,70	0
35	3300	Sopladores	3300-SP-3331/3332	3	3	1	2	3	2,30	1
36	3100	TK agua procesos	3100-TK-3101	1	4	1	2	5	3,00	0
37	3100	TK agua Sello	3100-TK-3105	1	3	1	2	5	2,50	0
38	3400	TK de concentrado	3400-TK-3404	2	3	1	2	5	2,50	1
39	3400	TK de rebose espesador	3400-TK-3420	1	5	1	2	5	3,50	1
40	3500	TK recirculacion overflow	3500-TK-3563	1	5	1	2	5	3,50	1
41	2400	Tolva	2400-BN-2401	2	3	1	1	5	2,40	1

Figura 4.5: Tabla de riesgo de los equipos de la planta. Elaboración propia.

Tabla 4.9: Resultados equipos críticos de alto riesgo. Elaboración propia.

Equipos críticos	Impacto
Molino de bolas	4,8
Molino SAG	4,5
Espesador concentrado	3,8
Filtro presión	3,8
Correa 2421	3,6
Alimentador de placas	3,5
Bombas cajón molienda	3,4

Para enriquecer el análisis previo, se elabora un diagrama de Jack Knife que complementa la evaluación. En la figura 4.6, se visualiza gráficamente el tiempo medio de reparación (MTTR), la frecuencia de falla y la indisponibilidad de los equipos. Los equipos se identifican como puntos en la gráfica, mientras que las líneas indican las medianas de MTTR, tasa de falla e indisponibilidad.

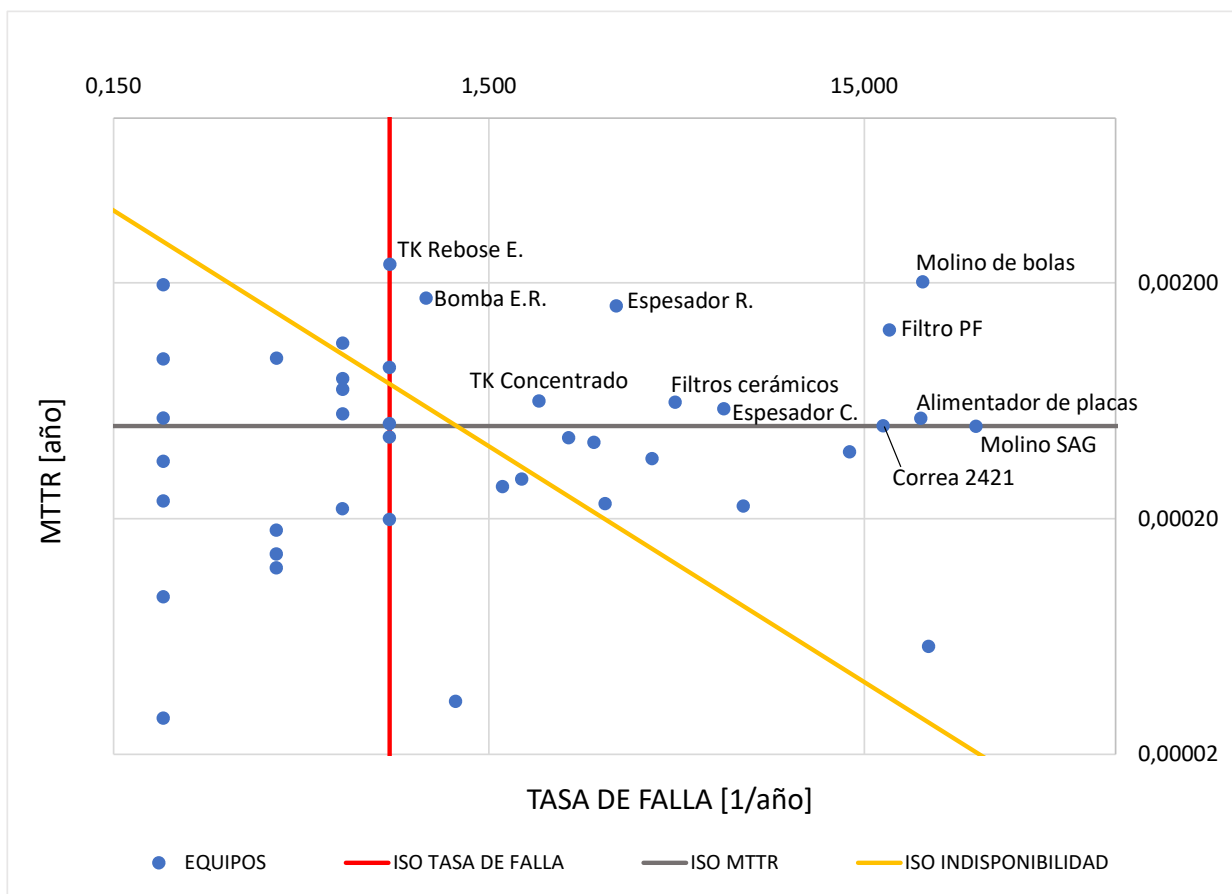


Figura 4.6: Diagrama de Jack Knife de Planta flotación de escoria. Elaboración propia.

Para interpretar el diagrama, se sitúan las líneas ISO. Los equipos que se encuentren por encima de las isolíneas se consideran críticos. En este contexto, se identifican 11 equipos, entre los cuales el molino de bolas emerge como el equipo de más riesgo, con una elevada tasa de falla, un extenso tiempo medio de reparación y una alta indisponibilidad, siendo el principal responsable de las interrupciones de producción. Asimismo, se consideran de alta criticidad, el filtro a presión de los concentrados, seguido por el espesador de relaves, molino SAG, alimentador de placas y correa 2421. Representando una menor criticidad que los equipos anteriores, se encuentran el espesador de concentrado, filtros cerámicos, tanque de concentrado, tanque de rebose del espesador y las bombas del espesador de relaves.

De manera similar, se confecciona el diagrama de dispersión de costos de la figura 4.7, considerando los costos globales específicos de mantenimiento y las indisponibilidades de los equipos de acuerdo con 2.14. Cabe recalcar que estos costos abarcan las intervenciones y pérdidas, donde estas últimas se estiman en base a las pérdidas de producción en toneladas y el valor del cobre en dólares (según [25]).

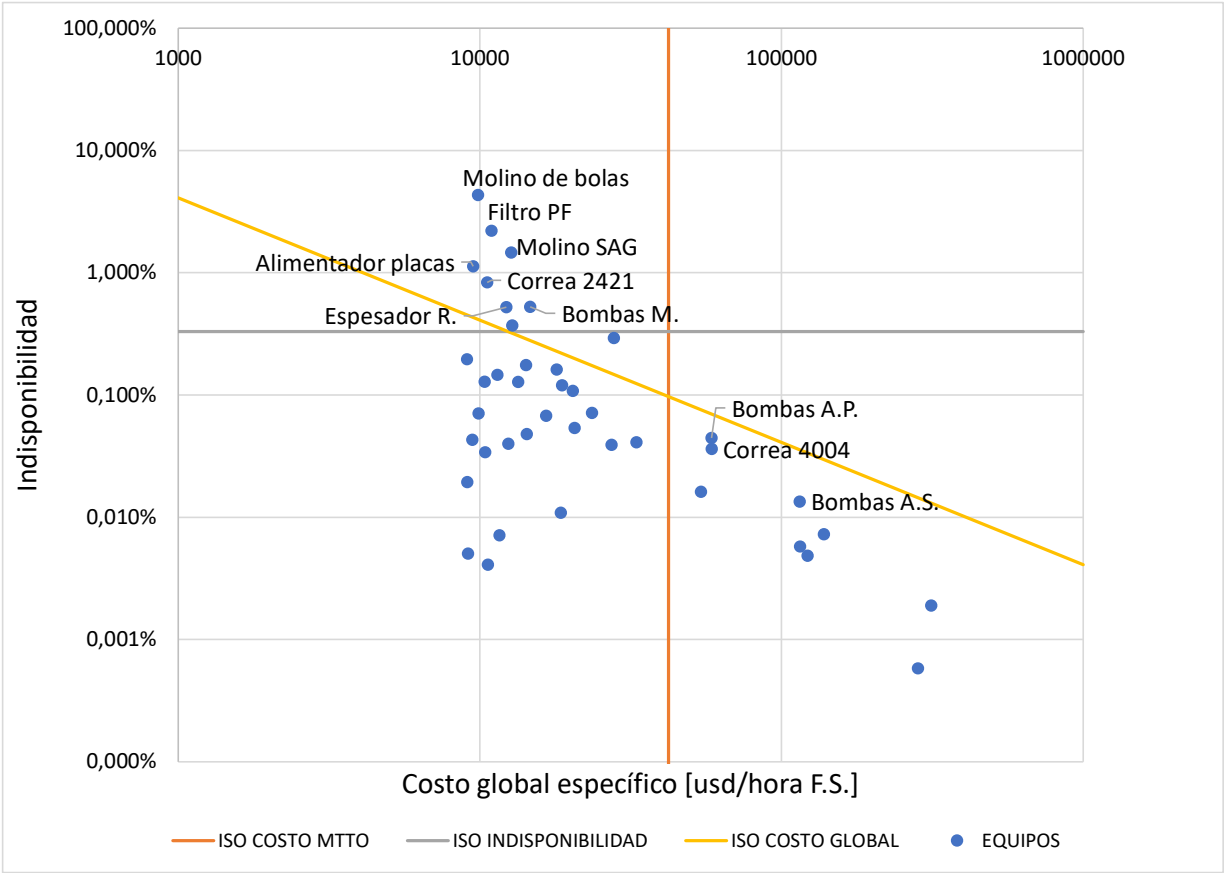


Figura 4.7: Diagrama de dispersión de costos de Planta flotación de escoria. Elaboración propia.

En este diagrama de costos, nuevamente, el equipo de mayor riesgo corresponde al molino de bolas. Aun cuando no presenta un costo global específico elevado, se distingue por su alto costo global total e indisponibilidad, derivados de la alta frecuencia de fallas, largos períodos de reparación y elevados costos de mantenimiento. A continuación, se encuentran el filtro a presión de concentrados, el molino SAG, el alimentador de placas y la correa 2421. Por otro lado, las bombas de aguas de procesos, bombas de agua de sello y la correa 4004 también pueden considerarse críticos, aunque en menor medida, ya que, si bien tienen un alto costo global específico, su indisponibilidad y costo global total son bajos. Estos equipos son cruciales para la operación de la planta y su mal desempeño tiene un impacto significativo en la producción y en los costos operativos.

Los datos indican que las estrategias de mantenimiento actuales para los equipos críticos pueden no ser las más efectivas. Además, dada la relación entre los altos costos de mantenimiento y la alta indisponibilidad, se presenta la oportunidad de explorar la incorporación de nuevos equipos, tecnologías y capacitación del personal para mejorar la eficiencia y reducir los costos a largo plazo.

4.1.1. Evaluación preliminar de confiabilidad

En el marco del análisis de criticidad de los equipos identificados, se emplean los indicadores de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad para evaluar su estado actual.

En las figuras (4.8 y 4.9), se visualiza un fragmento del proceso de cálculo de la confiabilidad y mantenibilidad para el molino de bolas. En ellas, se muestran las fechas asociadas a los eventos, permitiendo la determinación de los tiempos de operación, calculados como el intervalo entre fallas sucesivas.

La confiabilidad precisa de la densidad de probabilidad (f), que se modela empleando la ecuación 2.4, siendo sometida a una transformación logarítmica natural como parte del método de máxima verosimilitud. El proceso implica la maximización de la suma de la función \ln haciendo uso de la herramienta Solver de Excel, ajustando los parámetros escala (α) y forma (β) tentativos. La tabla 4.10 resume los resultados obtenidos, indicando los valores óptimos para dichos parámetros.

Tabla 4.10: Parámetros de Weibull para el molino de bolas. Elaboración propia.

α_R	277,9646	β_R	0,6477	\ln_R	-674,2498
------------	----------	-----------	--------	---------	-----------

La mantenibilidad se modela utilizando la distribución logarítmica normal, requiriendo del promedio y desviación estándar de los logaritmos naturales de los tiempos de reparación. Para ello, se genera una serie temporal que inicia en el tiempo ($t=0$), momento en el cual la

mantenibilidad es de 0%, y se extiende hasta alcanzar un resultado igual al 100%.

Por el contrario, la confiabilidad y el tiempo siguen un comportamiento inverso, es decir, para el tiempo inicial ($t=0$) la confiabilidad es del 100% y a medida que transcurre el tiempo, esta disminuye progresivamente.

Fecha evento	Tiempo (h)	f(t)	LN(f)	t	R(t)
19-07-2019 21:47	0			0	100,00%
23-07-2019 6:31	80,73	0,002299	-6,0753	0,05	99,63%
15-08-2019 17:21	562,83	0,000375	-7,8896	0,1	99,41%
15-12-2019 17:01	2927,67	0,000010	-11,4862	0,15	99,24%
18-12-2019 2:31	57,50	0,002831	-5,8671	0,2	99,08%
22-12-2019 10:53	104,37	0,001936	-6,2470	0,25	98,94%
20-01-2020 14:03	699,17	0,000273	-8,2043	0,3	98,81%
21-01-2020 14:00	23,95	0,004505	-5,4025	0,35	98,68%
06-03-2020 19:00	1085,00	0,000129	-8,9575	0,4	98,57%
23-03-2020 14:45	403,75	0,000572	-7,4669	0,45	98,45%

Figura 4.8: Fragmento de tabla de resultados de confiabilidad en relación con el tiempo del molino de bolas. Elaboración propia.

Tiempo rerp (h)	LN(T_rep)	t	M(t)
0,28	-1,26	0	0,00%
1,48	0,39	0,05	6,57%
2,33	0,85	0,1	12,11%
5,82	1,76	0,15	16,57%
3,57	1,27	0,2	20,31%
9,70	2,27	0,25	23,53%
4,63	1,53	0,3	26,36%
4,05	1,40	0,35	28,87%
117,00	4,76	0,4	31,15%
4,98	1,61	0,45	33,21%

Figura 4.9: Fragmento de tabla de resultados de mantenibilidad en relación con el tiempo del molino de bolas. Elaboración propia.

Esto permite trazar las curvas de confiabilidad 4.10 y mantenibilidad 4.12, obteniendo una aproximación del comportamiento de los equipos críticos a lo largo de su tiempo de funcionamiento y mantenimiento, facilitando la identificación de patrones y tendencias. Un descenso brusco en la curva de confiabilidad podría indicar puntos de vulnerabilidad, mientras que una alta mantenibilidad son indicativos de un rendimiento robusto.

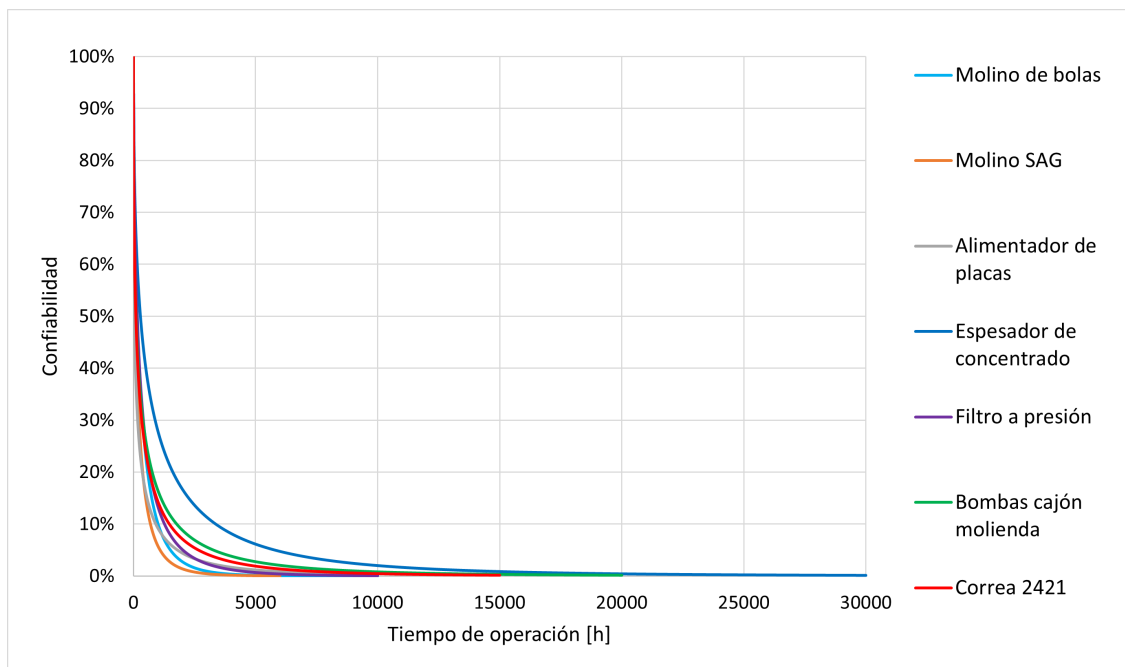


Figura 4.10: Curvas de confiabilidad de los equipos críticos. Elaboración propia.

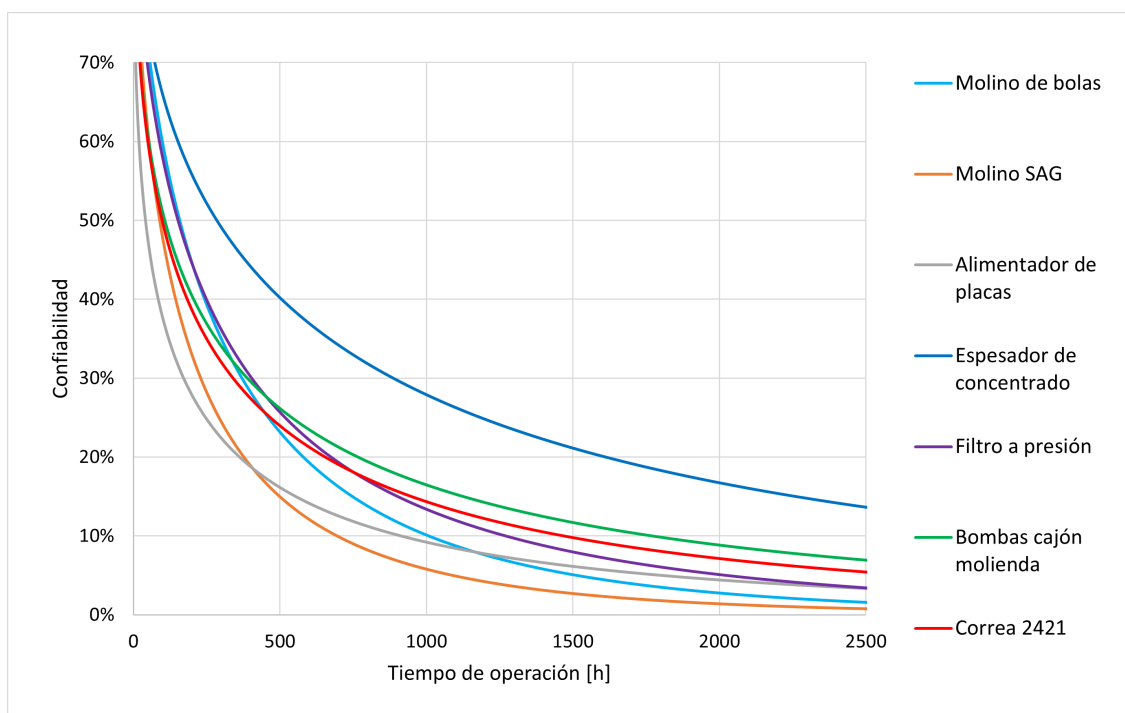


Figura 4.11: Acercamiento de las curvas de confiabilidad de los equipos críticos. Elaboración propia.

En el gráfico de la figura 4.10, se evidencia de manera clara y distintiva que la confiabilidad del espesador de concentrado supera a la de los demás equipos. Al realizar un acercamiento detallado en la imagen 4.11, resaltan las variaciones en las pendientes de las curvas, siendo la

más pronunciada la del alimentador de placas. Este hecho indica que la confiabilidad de dicho equipo disminuye rápidamente en las primeras 250 horas aproximadamente de operación.

Otra curva con una pendiente significativamente alta corresponde al molino SAG. Sin embargo, a partir de las 400 horas aproximadamente, la confiabilidad del alimentador de placas supera a la del molino SAG y mantiene esta superioridad hasta llegar a 0%. A partir de las 500 horas, se advierte un cambio en el comportamiento general. Durante este período, otro equipo que experimenta una rápida disminución en su confiabilidad es el molino de bolas. Antes de este cambio, cuando la confiabilidad alcanza el 25 %, se observa que la correa 2421, el molino de bolas, las bombas del cajón de molienda y el filtro a presión registran pendientes muy similares.

En resumen, se evidencia que el molino SAG y el alimentador de placas muestran las confiabilidades más bajas, mientras que la disminución en la confiabilidad del molino de bolas se manifiesta a partir de las 500 horas de operación.

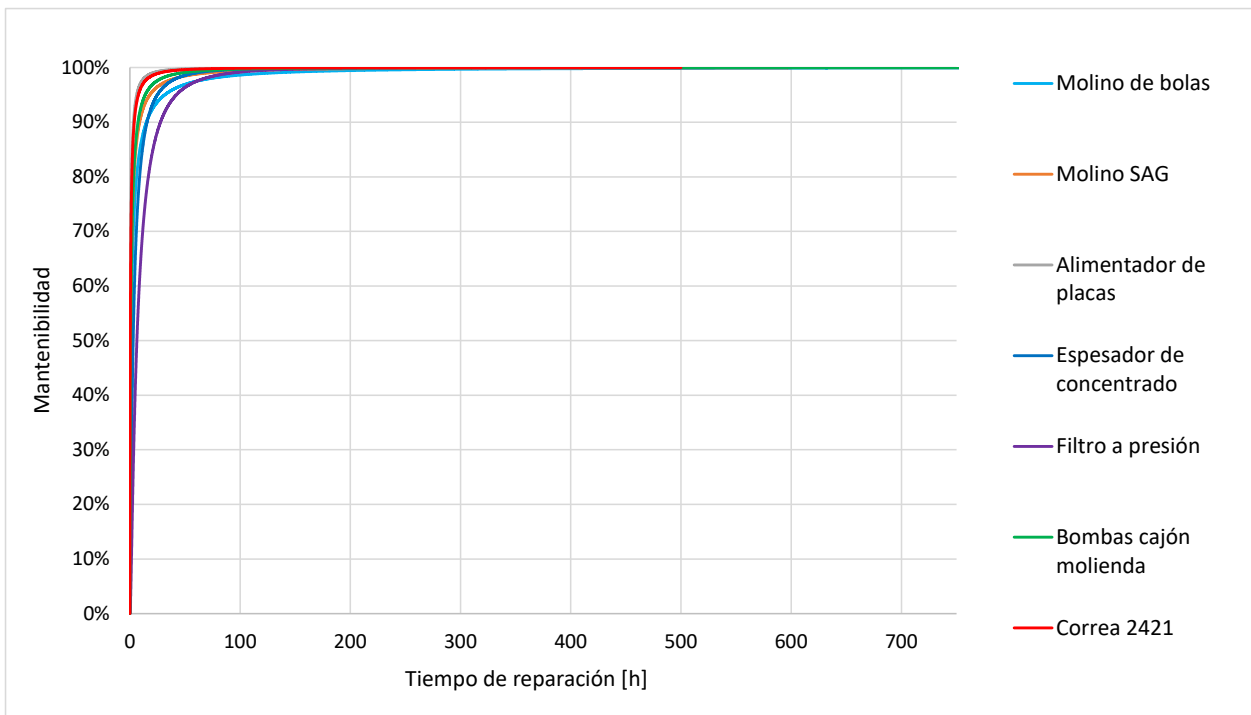


Figura 4.12: Curvas de mantenibilidad de los equipos críticos. Elaboración propia.

En el gráfico de mantenibilidad de la imagen 4.12, se aprecia un comportamiento general similar entre las curvas, con la excepción más notable del filtro a presión. Su desempeño es inferior en comparación con las otras curvas, manteniéndose por debajo hasta aproximadamente las 60 horas, momento en el cual comienzan a converger con las demás. Es relevante señalar que también se encuentra desplazada hacia la derecha, indicando una mayor demora en los tiempos de reparación.

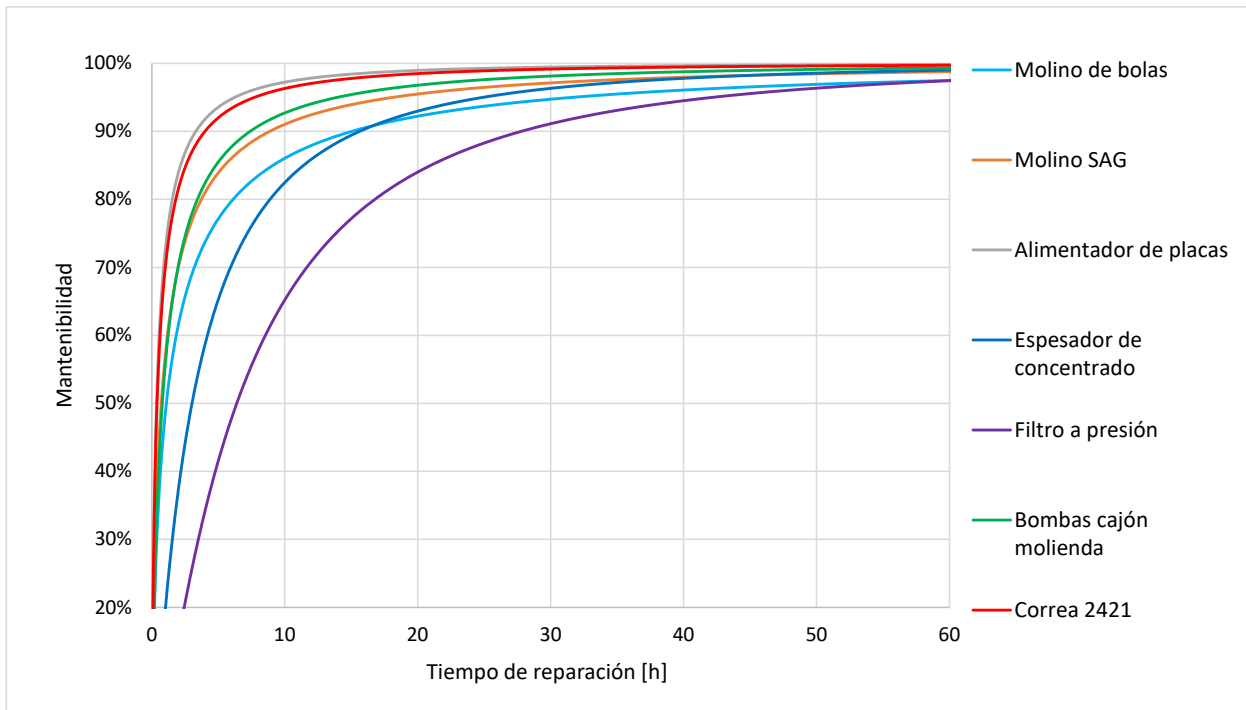


Figura 4.13: Acercamiento de las curvas de mantenibilidad de los equipos críticos. Elaboración propia.

Observando con mayor detalle en la figura 4.13, tanto el alimentador de placas como la correa 2421 se distinguen por sus pendientes pronunciadas, indicando una respuesta de reparación rápida y eficiente. Estos equipos parecen recuperarse con prontitud de eventos de fallas, minimizando así el tiempo de inactividad.

Las bombas del cajón de molienda y el molino SAG también revelan altas tasas de mantenibilidad, sugiriendo reparaciones rápidas. Aunque sus pendientes son menos pronunciadas que las del alimentador de placas y la correa 2421, indican una capacidad constante para abordar y resolver problemas de manera eficaz. En contraste, el alimentador de placas se sitúa como el equipo con la menor mantenibilidad, mostrando una respuesta más lenta y reparaciones prolongadas en comparación con los demás.

Por otro lado, el espesador de concentrado, a pesar de tener tiempos de reparación más elevados, manifiesta una rápida capacidad de recuperación. En cambio, el molino de bolas exhibe una reparación inicial rápida y después de transcurridas 17 horas, la probabilidad de completar la reparación incrementa gradualmente, indicando una capacidad de respuesta y reparación más lenta en comparación con los demás equipos.

4.1.1.1. Evaluación del estado de los equipos

Luego de examinar el comportamiento general de los equipos, resulta imperativo comprender su rendimiento en un instante de tiempo. Para lograr esto, se toma como punto de referencia la última fecha de revisión del 30 de noviembre de 2023 a las 9:00 AM. A partir de esto, se realiza el cálculo y análisis del rendimiento de cada equipo crítico.

La mantenibilidad se evalúa para un tiempo de reparación fijo de 10 horas, común para todos los equipos, lo que permite una comparación uniforme. Esta evaluación no implica prever con certeza el evento que causará la siguiente falla ni la duración exacta de la reparación, sino que se basa en una probabilidad de reparación dentro de ese tiempo. A partir de estos datos, se obtienen los valores de mantenibilidad y confiabilidad correspondientes, según las horas de operación transcurridas desde la última falla, como se detalla en la tabla 4.11.

Tabla 4.11: Indicadores RAM de la última revisión de condición de los equipos críticos. Elaboración propia.

Equipo crítico	Confiabilidad	Disponibilidad	Mantenibilidad
Molino de bolas	15,58 %	95,47 %	86,05 %
Molino SAG	7,47 %	98,35 %	91,04 %
Correa 2421	16,53 %	99,17 %	96,32 %
Alimentador de placas	15,06 %	98,88 %	97,24 %
Espesador de concentrado	13,30 %	99,63 %	82,48 %
Filtro de presión	4,20 %	97,84 %	65,21 %
Bombas cajón molienda	5,51 %	99,48 %	92,71 %

Analizando los indicadores, en términos generales, la disponibilidad de los equipos es alta, aspecto positivo para la continuidad operativa. Sin embargo, se identifica un área de oportunidad en confiabilidad y mantenibilidad, donde se pueden realizar mejoras significativas. Estos equipos poseen confiabilidades muy bajas, lo que significa que fallan seguidamente. No obstante, sus mantenibilidades son altas representando una respuesta rápida de reparación y levantamiento de los equipos.

En particular, el filtro de presión presenta los valores más bajos en mantenibilidad, indicando que podría ser un punto crítico en el sistema que requiere atención y optimización en las estrategias de mantenimiento. Asimismo, se percibe que el espesador de concentrado y el molino de bolas también proyectan valores bajos en mantenibilidad, sugiriendo que podrían beneficiarse de intervenciones específicas para mejorar su rendimiento.

Si bien es cierto que estos equipos gozan de una alta disponibilidad, siempre es oportuno velar por mantener los niveles más altos posibles. Dentro de ellos, el molino de bolas presenta el porcentaje más bajo de disponibilidad, seguido por el filtro a presión y el molino SAG. Aumentar ligeramente este indicador puede traducirse en una mejora sustancial en la eficiencia,

productividad global de la planta de procesamiento, así como en la reducción de costos de reparación y pérdidas de producción.

En términos de confiabilidad, se observan niveles más bajos para el filtro a presión, las bombas del cajón de molienda y el molino SAG, sugiriendo que estos equipos se encuentran en una etapa en que son más propensos a experimentar fallas. Esto podría ser una señal de que el equipo está envejeciendo o que está sujeto a condiciones que aceleran su deterioro y es necesario considerar medidas de mantenimiento, reemplazo o mejoras para evitar fallas inesperadas.

4.1.2. Selección del sistema crítico

Concluido el análisis de criticidad centrado en los riesgos, de manera consistente, se destaca al molino de bolas y al molino SAG como los equipos más críticos. No obstante, los resultados obtenidos de los análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, revelan que el espesador de concentrado, el filtro a presión y el alimentador de placas también figuran como equipos críticos. A pesar de estos hallazgos, se reafirma que los molinos evidencian resultados subóptimos en estos aspectos.

En concordancia con la filosofía de la metodología RCM, que concede una ponderación significativa al análisis de criticidad basado en riesgos, se ha determinado focalizar el estudio en el molino de bolas y el molino SAG. Este planteamiento proporcionará una comprensión más completa al evaluar ambos molinos de manera conjunta, considerando su interacción en el sistema de molienda de la planta de flotación.

A pesar de las altas disponibilidades en estos equipos, se reconoce una oportunidad para mejorar tanto su mantenibilidad como su confiabilidad, aspectos clave para lograr un perfeccionamiento continuo.

4.1.3. Balanced Scorecard

Una vez definido el sistema donde se aplicará la metodología RCM, es importante establecer los objetivos y metas específicas que se desean alcanzar en términos de confiabilidad, alineados con los ideales de la empresa y las metas esperadas en aplicaciones similares. Esto permitirá enfocar el desarrollo del análisis para cumplir dichos objetivos. Por lo tanto, esta información se organiza a través del Balanced Scorecard, como se muestra en la figura 4.14.

Objetivos estratégicos	Medidas (Kpi's)	Meta	Plan de acción	Perspectiva
Mejorar la eficacia de los costos de mantenimiento	Costo de mantenimiento [usd/año]	Actual: 916247 [usd/año] Objetivo: Reducir un 5% (870435 [usd/año])	Análisis de fallas y costos de mantenimiento, desarrollar estrategias de mantenimiento en base a RCM	Financiera
	Pérdida de producción por inactividad [tms/año]	Actual: 5040 [tms/año] Objetivo: Reducir un 5% (4788 [tms/año])		
Incrementar la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad	TTR [h] de modos de falla críticos	Reducir TTR en un 20%	Análisis de fallas, desarrollar estrategias de mantenimiento en base a RCM	Clientes
	TTF [h] de modos de falla críticos	Incrementar TTF en un 20%		
Mejorar proceso de mantenimiento y su documentación	Cumplimiento de la norma ISO 9001	Certificado de mantenimiento	Desarrollar los procedimientos de mantenimiento	Procesos internos
Asegurar un entrenamiento y formación adecuados para cumplir los objetivos	Nivel de entrenamiento por cada nivel de mantenimiento	Definición de los niveles precisos de formación por nivel de mantenimiento	Definir nivel de entrenamiento por cada nivel de mantenimiento, realizar entrenamiento y evaluación	Aprendizaje y crecimiento

Figura 4.14: Balanced Scorecard para mantenimiento. Elaboración propia.

En la perspectiva financiera, el objetivo es mejorar la eficacia de los costos de mantenimiento en el sistema de molienda, reduciendo estos gastos sin comprometer la confiabilidad y disponibilidad de los equipos. Se miden dos KPIs: el costo de mantenimiento (USD/año), actualmente de 916247 USD por año, con una meta de reducción del 5% alcanzando 870435 USD por año, y la pérdida de producción por inactividad (TMS/año) debido a las fallas en los equipos, actualmente de 5,040 toneladas al año, con el objetivo de reducirla en un 5% logrando 4,788 toneladas anuales. Para cumplir estas metas, se llevarán a cabo planes de acción

como el análisis de fallas para identificar las causas y costos asociados, y la implementación de la metodología RCM para mejorar las estrategias de mantenimiento.

Respecto a la perspectiva del cliente, el objetivo es mejorar la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de los equipos del sistema, lo que implica reducir la frecuencia de fallas, minimizar el tiempo fuera de servicio, y realizar reparaciones más rápidas y eficientes. Para evaluar el progreso, se emplean los indicadores de tiempo de reparación (TTR) y el tiempo entre fallas (TTF) de los modos de falla críticos. El TTR mide el tiempo de reparación después de una falla, con una meta de reducción del 20% para mejorar la eficiencia de las reparaciones. El TTF mide el tiempo hasta la falla, y se espera aumentarlo en un 20% para mejorar la confiabilidad y prolongar los períodos operativos. Los planes de acción abarcan los análisis de fallas, modos críticos y causas raíces, así como el desarrollo de estrategias de mantenimiento basadas en RCM para abordar las fallas críticas.

Para la perspectiva de procesos internos, el objetivo estratégico se centra en optimizar los procedimientos y prácticas de mantenimiento y en mantener una documentación precisa que garantice la consistencia y calidad de las operaciones de mantenimiento. La medida KPI de cumplimiento de la norma ISO 9001, evalúa el progreso hacia este objetivo, asegurando que los procesos de mantenimiento cumplan con los estándares internacionales de calidad, mejora continua y expectativas del cliente [26]. La meta es obtener una certificación oficial que reconozca la conformidad con estos estándares. Para cumplir los objetivos, se siguen planes de acción específicos, como desarrollar y documentar procedimientos de mantenimiento, integrando manuales, instrucciones de trabajo y listas de verificación para guiar al equipo de mantenimiento en la ejecución eficiente de sus tareas.

Finalmente, en la perspectiva de aprendizaje y crecimiento, el objetivo principal es garantizar que el personal, especialmente los de mantenimiento, reciban la capacitación necesaria para desempeñar sus roles eficientemente. Dentro de las medidas de evaluación se pueden considerar la cantidad de horas de formación completadas, cursos aprobados, porcentaje de personal capacitado y calificaciones en evaluaciones. Como metas, se incluye la definición de los conocimientos y habilidades requeridos para cada nivel de mantenimiento. Los planes de acción consisten en organizar y llevar a cabo sesiones de formación y entrenamiento, evaluando su efectividad mediante pruebas, encuestas y observaciones del desempeño en el trabajo.

4.2. Contexto operacional del sistema de molienda

La primera etapa en la implementación del RCM consiste en contextualizar la situación operacional del sistema de molienda. Para lograr una comprensión plena de este sistema, es imprescindible abordar preguntas tales como: ¿Cuál es su propósito? ¿Cómo opera en términos de procesos y secuencias? ¿Qué equipos específicos integran este sistema? Estas in-

terrogantes conducen a la exploración detallada del contexto operacional del sistema, donde se analizarán parámetros como el tipo de proceso, las condiciones ambientales, los estándares de calidad, las normativas de seguridad, objetivo del sistema, funcionamiento, entre otros.

Es necesario distinguir entre el área de molienda y el sistema de molienda. El área de molienda engloba la operación integrada de varios sistemas, incluyendo el sistema de molienda, el sistema de clasificación y el sistema de transporte. Cada uno de ellos cuenta con equipos diseñados para cumplir fines específicos.

En términos generales, el sistema de molienda se configura como un conjunto de equipos y procesos diseñados para la trituración y reducción del tamaño de partículas de escoria de cobre. Este procedimiento emplea fuerzas mecánicas controladas para fragmentar el material en partículas más pequeñas, adaptándose a las particularidades de los equipos empleados.

Centrándose específicamente en la Planta de Flotación de Escoria de Cobre, a continuación se describe detalladamente los aspectos fundamentales de este sistema.

4.2.1. Propósito

El propósito del sistema de molienda es reducir la granulometría de la escoria requebrajada, proveniente de las ollas de enfriamiento con un flujo diario de 1530 toneladas. Se busca alcanzar un P80 de 44 micrómetros, lo que implica que el 80% de las partículas cumplan con este tamaño específico. Este refinamiento potencia la eficacia en el proceso de flotación, contribuyendo de manera significativa a la recuperación eficiente del concentrado de cobre.

4.2.2. Descripción general del sistema

El sistema de molienda está estructurado en dos fases: una molienda primaria, ejecutada a través un molino SAG, seguida por una molienda secundaria, realizada con un molino de bolas. Ambos equipos operan bajo un tipo de molienda húmeda, en un circuito inverso, lo que implica que el material se somete primero a un equipo y luego al otro, estableciendo así un circuito cerrado. Durante la fase inicial, se logra una notable reducción en el tamaño de la escoria, siendo el molino de bolas responsable de alcanzar la granulometría esperada. Como complemento, interviene el sistema de clasificación, que determina el tamaño preciso de las partículas. En este procedimiento, una batería de hidrociclones con recirculación al molino de bolas garantiza que las partículas alcancen la dimensión deseada con precisión.

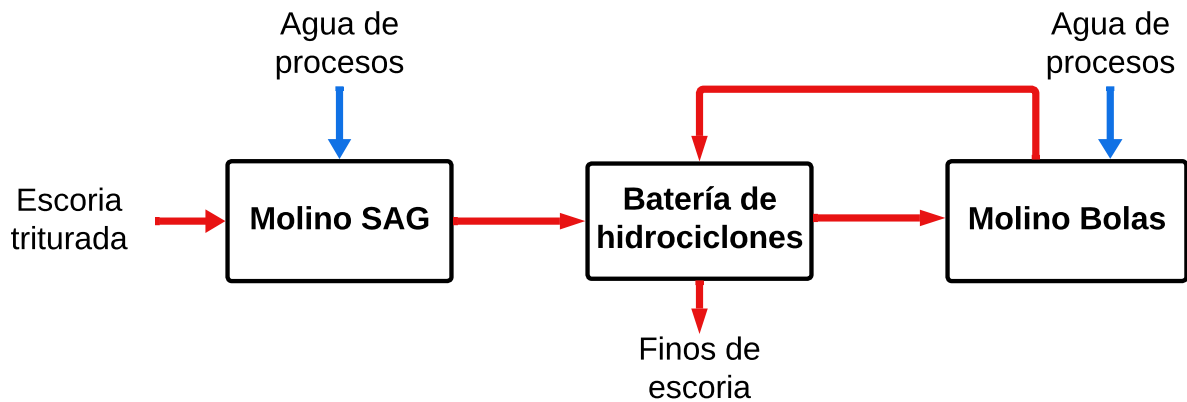


Figura 4.15: Diagrama de bloques del sistema de molienda. Elaboración propia.

En la figura 4.15 se presenta el diagrama de bloques del sistema. Es conveniente evaluar su capacidad para mantener la operatividad en caso de falla de alguno de los equipos. El análisis revela que si el molino SAG o el molino de bolas fallan, la planta se detiene, dado que ambos equipos operan en un circuito en serie. No obstante, existe la posibilidad de que el molino de bolas siga funcionando temporalmente si el molino SAG fallara, debido a la carga residual en el cajón de molienda; sin embargo, en la práctica, esta opción no se utiliza por razones de seguridad para proteger los equipos, recursos y eficiencia.

En contraste, los hidrociclones están diseñados con redundancia efectiva. El sistema cuenta con cinco hidrociclones en operación y tres adicionales en stand-by, listos para activarse en caso de fallo de alguno de los ciclones operativos. Esta configuración garantiza que el proceso de clasificación continúe sin interrupciones significativas, fortaleciendo la robustez del sistema y minimizando el impacto de posibles fallas en los hidrociclones.

4.2.3. Condiciones ambientales

La ubicación de la planta de flotación de escoria en Fundición Potrerillos, División El Salvador, impone una influencia directa del entorno climático específico de la región sobre el sistema de molienda. Es fundamental considerar estos factores ambientales para comprender su impacto en la operación y eficiencia del sistema.

El análisis de las temperaturas en esta localidad, ilustrado en la figura 4.16, revela que las temperaturas máximas anuales tienden a registrarse en los meses de verano. No obstante, la variación en estas temperaturas elevadas no es significativa, oscilando entre 21 y 26 grados Celsius. En contraste, las temperaturas mínimas promedio por mes tienden a descender durante el otoño e invierno, alcanzando valores mínimos de 5 grados Celsius. Se han registrado temperaturas extremas de -7 y 32°C. Esta variabilidad térmica, especialmente marcada en los meses más fríos del año, podría influir en el desempeño del sistema, afectando aspectos como la viscosidad de los materiales, el desgaste de componentes y la eficiencia térmica del

proceso de molienda.

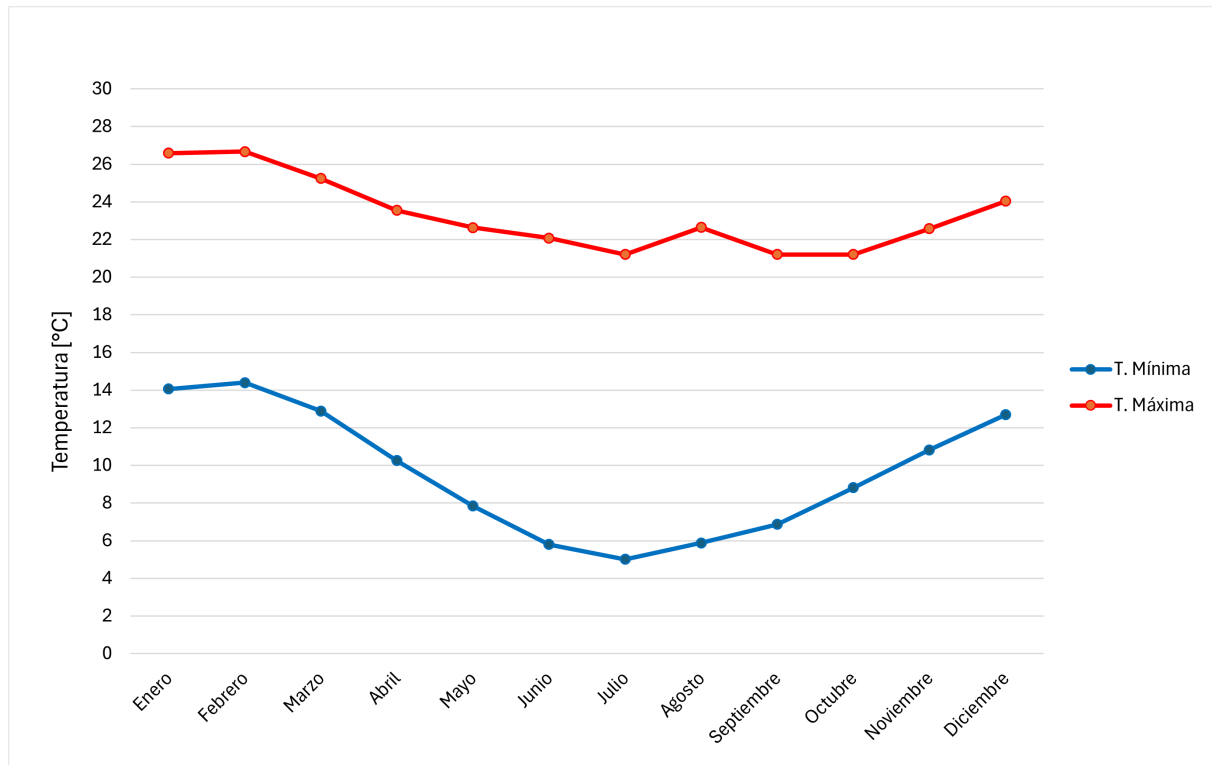


Figura 4.16: Gráfico de temperaturas medias mínimas y máximas por mes (2005-2024). [27].

En relación con los vientos, tanto la velocidad como la dirección son aspectos importantes a estudiar. De acuerdo con registros históricos, la velocidad promedio del viento varía entre 6 y 8 km/h, con una dirección predominante del suroeste en distintas estaciones del año, aunque se han registrado extremos de hasta 40 km/h. Esta dinámica impacta en la dispersión de polvo y en la operación segura del sistema.

La humedad relativa constituye otro aspecto clave a considerar. Su variabilidad puede tener un impacto significativo, influyendo en la formación de polvo durante el proceso de molienda y afectando la eficacia de procesos específicos. Se observan valores promedio que fluctúan entre el 66 % y el 75 % en distintas estaciones. No obstante, se han registrado valores mínimos que descienden por debajo del 20 %, mientras que los máximos superan el 97 %.

De acuerdo a los datos climáticos anteriores, dispuestos por la Dirección Meteorológica de Chile [27], se entrega una visión más completa del entorno en el que opera el sistema de molienda, permitiendo la implementación de medidas adecuadas para adaptarse y optimizar su desempeño en las diversas condiciones de Potrerillos. Esta acción no solo tiene el potencial de mejorar la eficiencia operativa del sistema de molienda, sino que también contribuye a la seguridad y la durabilidad de las instalaciones en la planta de flotación de escoria de Fundación Potrerillos.

4.2.4. Descripción específica del proceso

La alimentación a la planta proviene del Convertidor Teniente en forma de escoria líquida y es transportada usando ollas hasta el área de enfriamiento. El material se enfría en estos contenedores durante 32 horas, mientras se agrega agua. Posteriormente, se vierte el agua flotante y se descarga la escoria en un acopio. En este punto, la escoria adquiere una consistencia sólida y quebradiza. Un tractor con orugas metálicas se encarga de fragmentarla, obteniendo tamaños inferiores a 10 pulgadas. La escoria se almacena en una tolva y luego se transporta al área de molienda mediante un sistema de correas transportadoras. La composición de esta escoria comprende un 7,9 % de cobre, 45,6 % de hierro, 2,3 % de azufre, 20 % de magnetita (Fe_3O_4), y 23,6 % de dióxido de silicio (SiO_2).

La planta de flotación de escoria opera durante 340 días al año, con una alimentación nominal de 1530 toneladas diarias. Al ingresar al sector de molienda, el material tiene un tamaño inicial (f_{80}) de 152,2 mm y un tamaño máximo (f_{100}) de 254 mm, es decir, el 100 % del material se encuentra por debajo de este tamaño, con una gravedad específica de 3,7.

Para seguir la línea del proceso, se hace referencia a los diagramas P&ID del molino SAG y molino de bolas de las figuras 6.1 y 6.2 respectivamente, ubicadas en el Anexo A.

En el área de molienda, la escoria es recibida y transportada por una correa hasta un chute de descarga fijo. Este chute suministra el material a un chute móvil, que además recibe el agua añadida para formar la pulpa, junto con las bolas de acero que realizan la molienda en el molino SAG. La descarga resultante de este chute móvil fluye directamente hacia el interior del molino, que tiene un diámetro de 4,88 m, una longitud de 2,44 m, y una potencia instalada de 1100 kW.

Las condiciones de operación del molino SAG establecen un máximo del 30 % de volumen de llenado total, donde hasta un 12 % corresponde al llenado de bolas. Estas bolas, con un diámetro de 135 mm, junto con el movimiento rotativo del tambor del molino, llevan a cabo la molienda del material. Una vez que el material alcanza un tamaño específico, se filtra a través del trommel con aberturas de 19 mm y se dirige hacia el molino de bolas, presentando un 76 % de sólidos en la pulpa. En caso contrario, el material retenido en la malla del trommel es transportado por correas de retorno al molino para ser triturado nuevamente, en un proceso de recirculación del 15 %.

La pulpa generada por el molino SAG fluye hacia un cajón de descarga compartido entre molinos. Desde este punto, dos bombas centrífugas operan en paralelo, cada una con una potencia de 250 hp, impulsando el material hacia la batería de hidrociclones (8 ciclones). La fracción fina resultante de la clasificación realizada por estos, continúa su trayectoria hacia el área de flotación, mientras que la fracción gruesa avanza hacia el molino de bolas.

El molino de bolas utiliza bolas de acero de 50 mm para su proceso, en un porcentaje de carga del 33%. Este tiene un diámetro de 4,57 m, una longitud de 7,07 m y una potencia instalada de 2500 kW. El material ingresa al molino por medio de un chute, y tras ser procesado, evacúa a causa de una descarga tipo rebalse, generando una pulpa con un 72% de sólidos, que retorna al cajón de molienda. Este proceso de remolienda se repite hasta alcanzar la granulometría deseada de 44 micrómetros, donde el 80% del producto final se encuentra por debajo de ese tamaño.

4.2.5. Equipos del sistema

Dentro de los equipos identificados en el proceso, se toman como parte del sistema de molienda exclusivamente el molino SAG y el molino de bolas. Ambos se alinean con la finalidad de triturar el material. En el Anexo B, se adjuntan los diagramas P&ID detallados de estos molinos, lo que facilita la revisión de los diversos componentes que integran cada equipo. De manera general, las partes principales de ambos molinos se presentan en la figura 4.17.

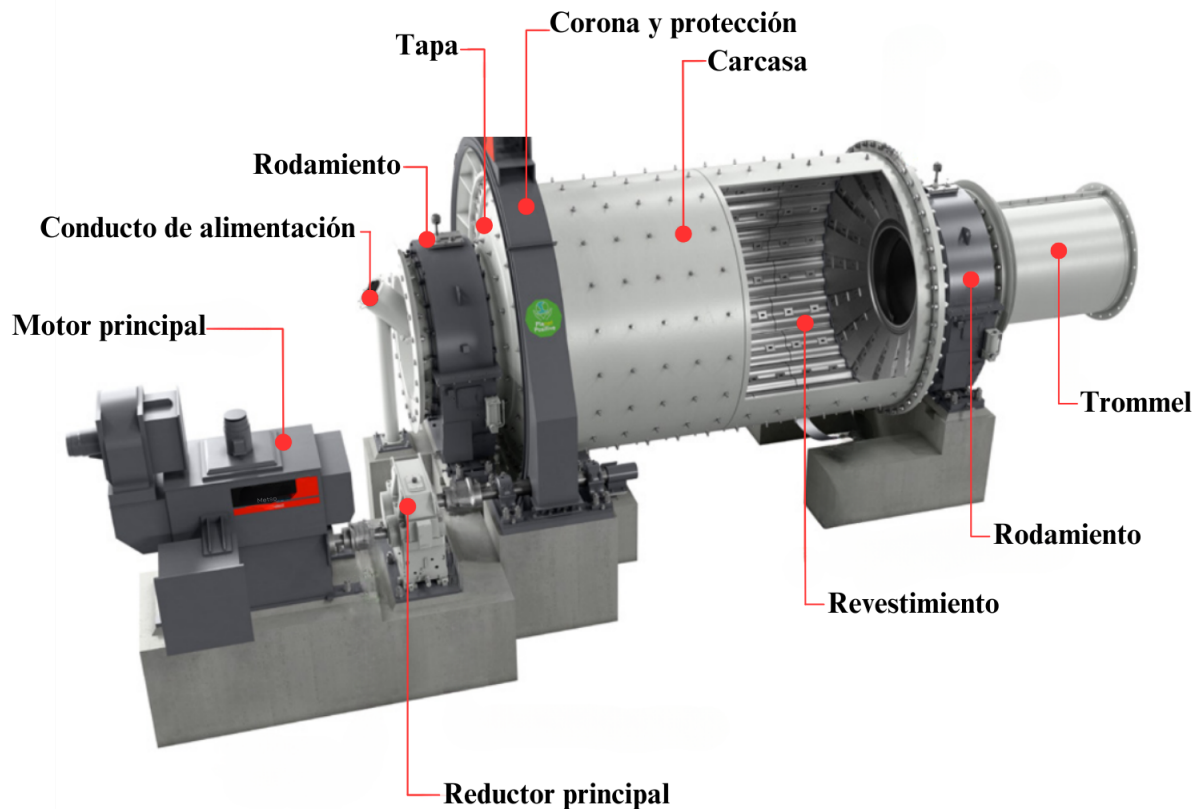


Figura 4.17: Esquema de las partes principales de un molino [28].

Ambos molinos se consideran sistemas por sí mismos y pueden clasificarse en subsistemas, con cada uno de ellos compuesto por varios componentes. Esta estructura facilita la organización y la identificación de los modos de falla del equipo. Los sistemas principales incluyen el sistema estructural, el sistema de accionamiento, el sistema de avance lento, el sistema de alimentación y descarga, y el sistema de lubricación. Es importante mencionar que para el molino de bolas, en el sistema de accionamiento se agrega el embrague de aire como componente adicional.

- **Sistema estructural:** Carcasa del molino, cabezales con sus muñones y revestimientos.
- **Sistema de accionamiento:** Motor principal, reductor de velocidad principal, corona, piñón, rodamientos del piñón, rodamientos principales del molino y sus bastidores.
- **Sistema de avance lento:** Motor de accionamiento auxiliar y reductor de engranajes auxiliar.
- **Sistema de alimentación y descarga:** Conducto de alimentación, chute de alimentación, revestimiento muñones, sello de alimentación, anillo de retención de bolas y trommel.
- **Sistemas de lubricación:** Engrasado de rodamientos principales, rociado de grasa a engranajes y lubricación con aceite a caja de engranes principal y rodamientos del eje del piñón.

4.2.5.1. Molino SAG

El molino semiautógeno, también conocido como molino SAG, se encarga de la etapa primaria de molienda, reduciendo el tamaño del mineral para su posterior procesamiento. La designación de semiautógeno refleja el empleo del mismo material de alimentación combinado con bolas de acero para llevar a cabo la molienda. Este equipo gira horizontalmente gracias a un motor ajustable que regula la velocidad operativa.

Durante la rotación del molino, se produce un efecto combinado de cascada y catarata entre la carga y los medios de molienda. El efecto de cascada ocurre cuando las bolas de acero ruedan desde la parte alta a la parte baja del molino, siguiendo una trayectoria adyacente a la pared y produciendo fraccionamiento por fricción, lo que resulta en una molienda más fina. Por otro lado, el efecto de catarata eleva las bolas hasta cierta altura antes de que caigan debido a la gravedad, fragmentando el material por impacto y produciendo partículas más gruesas. La unión de estos mecanismos de impacto, desgaste y abrasión contribuye a una molienda eficiente. El proceso continúa hasta que el material alcanza un tamaño igual o inferior a la apertura de la rejilla interna en la descarga, momento en el cual las partículas más pequeñas pasan a través de la rejilla, mientras que las más grandes y las bolas de acero se retienen hasta completar el proceso de molienda.

Es crucial mantener la carga en el molino SAG dentro de los límites específicos de volumen durante la operación. Cargas volumétricas bajas pueden ocasionar la ruptura de bolas y revestimientos, mientras que cargas volumétricas altas pueden generar sobrecargas y potenciales daños en la canaleta de carga del molino, sellos, entre otros componentes.

Se incorpora información técnica adicional sobre el molino en la tabla 4.12.

Tabla 4.12: Información técnica del molino SAG [29].

Tamaño de la alimentación F80	152,2 mm	Tamaño de la alimentación F100	254 mm
Tamaño del producto P80	8 mm	Tipo de descarga	Parrilla y trommel
Diámetro efectivo	4,88 m	Largo efectivo	2,44 m
Potencia instalada	1100 kW	Máxima potencia consumida	900 kW
Ángulo de tapas	15°	Apertura parrilla interna (nueva y máx uso)	12,7 - 21 mm
Apertura de las parrillas trommel	19 mm	Soporte del molino	Muñón
Tipo de accionamiento	Piñón simple	Montaje del accionamiento	Flange interior
Tipo de motor	Motor de inducción de rotor bobinado	Velocidad de diseño, mín. y máx.	12,1 a 15,2 rpm
Fracción de la velocidad crítica	70 - 80 %	Dirección de giro de la carcasa	Bidireccional
Material del revestimiento	Acero	Grosor del revestimiento	6 mm
Tamaño máximo de las bolas de molienda	127 mm (5 in)	Nivel de carga de bolas máxima recomendada	12 %
Nivel de carga de llenado total máx recomendado	30 %	Fracción de sólidos en la pulpa	76 %
Pebbles recirculados	15 %	Humedad de los pebbles	1,8 %

4.2.5.2. Molino de bolas

El molino de bolas, diseñado para reducir el tamaño de las partículas del material en una segunda etapa de molienda, presenta una configuración que lo diferencia del molino SAG. Utiliza exclusivamente bolas de acero como medio de molienda y se compone de un tambor cilíndrico horizontal, de mayor longitud que el molino SAG. La rotación de este tambor es posible gracias a un motor, generando en su interior el efecto de cascada y catarata, necesario para la eficiente molienda del material.

Una característica distintiva del molino de bolas es su método de descarga por rebalse. Este proceso ocurre una vez que el material molido ha alcanzado un tamaño suficientemente pequeño. En este punto, se produce un desbordamiento en el extremo de descarga del molino, permitiendo que el material procesado continúe su camino hacia los hidrociclones para su clasificación. A diferencia de utilizar un mecanismo de control para la liberación gradual del material molido, el diseño de descarga por rebalse permite que el exceso de material se desborde de manera natural. Esta estrategia eficiente asegura que las partículas finas alcancen su destino sin retención innecesaria en el molino.

En la siguiente tabla 4.13, se presenta información técnica particular sobre el molino de bolas.

Tabla 4.13: Información técnica del molino de bolas [30].

Tamaño de la alimentación F80	8 mm	Tamaño producto F80	44 μm
Diámetro efectivo	4,57 m	Largo efectivo	7,07 m
Potencia instalada	2500 kW	Potencia consumida	2200 - 2500 kW
Ángulo de tapas	20°	Tipo de descarga	Por rebalse
Soporte del molino	Muñón	Tipo accionamiento	Piñón simple
Montaje del accionamiento	Flange interior	Tipo de motor	LSSM - Motor sincrónico
Velocidad de diseño, mín y máx	15,3 rpm	Fracción de velocidad crítica	75 %
Fracción de sólidos en la pulpa	72 %	Dirección de giro de la carcasa	Sentido antihorario (vista extremo de alimentación)
Material del revestimiento	Goma	Grosor revestimiento	6 mm
Tamaño máximo de bolas de molienda	50 mm (2 in)	Nivel de carga de bolas máximo recomendado	33 %

4.2.5.3. Seguridad operacional y dispositivos

La gestión de riesgos operacionales en la planta de flotación de escoria se fundamenta en la aplicación de normas corporativas y procedimientos internos, como los Estándares de Control de Fatalidades (ECF) y los Estándares de Salud en el Trabajo (EST). Los ECF abordan aspectos sobre aislación, bloqueo, manejo de sustancias peligrosas, entre otros. Por su parte, los EST incluyen gestión de salud, vigilancia médica, higiene, y otros. Además, se implementan medidas preventivas como el uso de EPP, charlas de seguridad y protocolos de prevención. Lo anterior, complementa las normativas regulatorias nacionales, referente al reglamento de seguridad minera [31], control de emisiones [32], condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo [33] y la Ley sobre accidentes laborales [34].

Por otro lado, los molinos demandan sistemas de seguridad que operen de manera coordinada con sus componentes para garantizar la protección del equipo y del proceso en su conjunto. La siguiente tabla 4.14 ofrece un desglose de los dispositivos de seguridad instalados. El control de los molinos se realiza mediante un controlador lógico programable (PLC) y se dispone de botones de parada de emergencia para ambos equipos.

Tabla 4.14: Dispositivos de seguridad de los molinos. Elaboración propia.

Categoría	Dispositivos de seguridad	Ubicación	Equipo
Frecuencia	Indicador	Reductor de velocidad principal y auxiliar	Molino SAG y de bolas
Nivel	Interruptor, indicador y alarmas	Unidades de lubricación de rodamientos, engranajes y reductor	Molino SAG y de bolas
Peso	Sensor, indicador y transmisor	Rodamientos	Molino SAG
Posición	Interruptor, interruptor de control, interruptor de restricción, indicador, transmisor y alarmas	Rodamientos y reductor de velocidad	Molino SAG y de bolas
Presión	Indicador, interruptor de presión baja y alarmas	Unidad de lubricación del reductor y motor principal	Molino SAG y de bolas
Temperatura	Sensor, indicador, transmisor y alarma	Reductor de velocidad, unidad de lubricación del reductor, rodamientos y motor principal	Molino SAG y de bolas
Velocidad	Interruptor velocidad alta	Reductor de velocidad	Molino SAG
Vibración	Sensor	Motor principal, reductor de velocidad y rodamientos	Molino SAG

4.2.6. Diagrama EPS

En la siguiente figura, se despliega el Diagrama EPS que ilustra la estructura del sistema, resaltando sus elementos fundamentales: entradas, procesos y salidas.

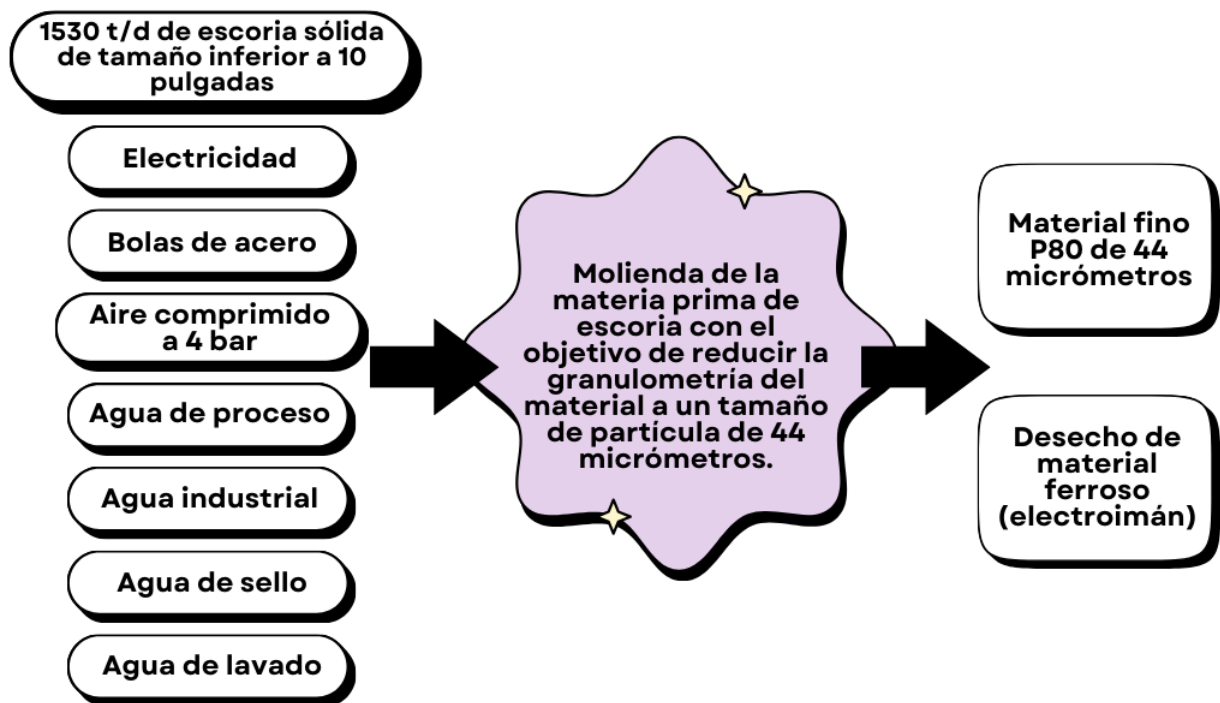


Figura 4.18: Diagrama EPS del sistema de molienda. Elaboración propia.

Las entradas del sistema abarcan diversos insumos, incluyendo la escoria como materia prima, así como los suministros de agua necesarios para el proceso y el aporte de aire. Además, se consideran servicios esenciales como la electricidad. El proceso se enlaza directamente con la descripción detallada en la sección anterior 4.2.4. En cuanto a las salidas del sistema, comprenden el resultado del procesamiento del material, generando productos refinados y elementos ferrosos secundarios, que son separados por el electroimán en la correa Flexowell del proceso.

4.3. Análisis de modos y efectos de fallas (FMECA)

Tras establecer el contexto operacional del sistema, se procede a analizar sus fallas. Entre las metodologías de análisis expuestas en la sección 2.4.3, se opta por emplear FMECA debido a su capacidad para identificar modos potenciales de falla, evaluar sus efectos y determinar su criticidad. Esta metodología resulta relevante para mejorar la confiabilidad y mantenibilidad de los equipos y sistemas, alineándose con los objetivos del RCM3.

El análisis FMECA se inicia definiendo las funciones del sistema, centrándose en los molinos de bolas y SAG respectivamente. Las funciones se desglosan en subsistemas y componentes específicos para facilitar la identificación de los estados, modos, efectos, consecuencias y riesgos de falla.

4.3.1. Funciones

Recordando la estructura de una función, conforme a lo establecido en la sección 2.4.3.3.1, es fundamental abordar el propósito del equipo y su estándar de desempeño operativo.

En el caso de los equipos mencionados, la función primaria del molino SAG es reducir el tamaño de la escoria de cobre desde un tamaño inicial F80 de 152,2 mm y F100 de 254 mm hasta un tamaño de salida P80 de 8 mm, procesando un flujo diario de 1530 toneladas. Por otro lado, la función del molino de bolas consiste en realizar una segunda molienda más fina del material, reduciendo su tamaño desde un valor de partícula F80 de 8 mm hasta obtener un tamaño final P80 de 44 μm , procesando un flujo diario de 1530 toneladas.

En secciones previas, se detalló la composición de los subsistemas de ambos equipos, los que tienen funciones específicas que se detallan a continuación.

- ▶ **Sistema estructural:** Ofrece soporte a los componentes internos del molino, asegurando estabilidad, alineación, protección y contención del material y los medios de molienda. Proporciona una base robusta para sostener el molino, permitiendo una rotación suave del eje al distribuir cargas y reducir la fricción, evitando así el desgaste prematuro. Además, garantiza la alineación adecuada del eje y resiste cargas radiales y axiales para mantener la estabilidad estructural del equipo.
- ▶ **Sistema de accionamiento:** Transforma la energía proveniente del motor principal en energía mecánica para girar el tambor del molino, asegurando el inicio y mantenimiento de este movimiento rotativo. Suministra y controla la velocidad y el torque requeridos para su operación.
- ▶ **Sistema de avance lento:** Proporciona un control preciso de la velocidad de giro del molino, facilitando el arranque suave, evitando impactos bruscos y reduciendo el estrés en los componentes durante períodos de instalación y el mantenimiento.

- ▶ **Sistema de alimentación y descarga:** Proporciona una interfaz para la introducción y salida de material de proceso al molino.
- ▶ **Sistema de lubricación:** Garantiza la adecuada lubricación de los componentes móviles, como los rodamientos y piñones, reduciendo la fricción y el desgaste para prolongar la vida útil del equipo. Asimismo, contribuye a la disipación del calor generado durante la operación, previniendo sobrecalentamientos y asegurando condiciones de trabajo óptimas. Además, proporciona protección contra la corrosión al crear una capa lubricante que evita el contacto directo de los componentes metálicos con el entorno corrosivo.

Los sistemas mencionados involucran una variedad de componentes. Dado que los molinos operan en condiciones similares y comparten características técnicas en la mayoría de los casos, a continuación, se presentan de forma conjunta las funciones de los componentes de estos equipos, resaltando sus características técnicas individuales.

- Carcasa del molino: Placas de acero al carbono laminadas y soldadas que forman el tambor que alberga los medios de molienda y el material dentro del molino, proporciona el soporte estructural para los revestimientos internos.
- Cabezales del molino: Estructuras de fierro fundido dúctil que forman y sellan los extremos del molino, definen los diámetros de alimentación y descarga, actúan como barrera física de protección para contener el material y proporcionan soporte a los revestimientos.
- Muñones de los cabezales: Proporcionan soporte al tambor, funcionando como ejes de rotación, ubicados en los extremos para alojar los rodamientos principales.
- Revestimiento o respaldo: Se utiliza goma vulcanizada no reforzada para el molino de bolas y acero para el molino SAG, ambos con un espesor de 6 mm. Este elemento, protege la estructura interna del cilindro del molino contra el impacto y el desgaste, además de asentar los revestimientos de levante.
- Revestimientos de levante de la carcasa y cabezales: Elementos de placa con barras de levante separadas que protegen el interior del cilindro del molino del impacto y desgaste, levantan la carga durante la molienda, generando el efecto cascada y catarata, y brindan sujeción adicional a las placas de la carcasa y cabezales manteniéndolas en su lugar.
- Motor principal: Transforma la energía eléctrica en energía mecánica rotacional. En el molino de bolas, se emplea un motor síncrono de 2500 kW, mientras que en el molino SAG se utiliza un motor de inducción de rotor bobinado con una potencia de 1100 kW.
- Reductor de velocidad principal: Ajusta y reduce la velocidad de rotación proveniente del motor principal a un rango entre 12,7 y 15,2 rpm, para aumentar el torque transmitido al piñón y mover el tambor del molino. Utilizado solo en el molino SAG.

- Corona: Transmite la potencia mecánica desde el piñón hacia el tambor del molino mediante el engranaje helicoidal simple de sus dientes. Fabricada en mitades o cuartos que envuelven la carcasa del molino.
- Piñón: Transmite la potencia mecánica proveniente de la caja reductora de velocidad hacia la corona.
- Rodamientos del piñón: Rodamientos de rodillo en rótula, que brindan soporte y permiten la rotación suave del eje del piñón, manejando cargas radiales y axiales.
- Embrague de aire: Facilita el acoplamiento y desacoplamiento entre el accionamiento del motor principal y el eje del piñón, permitiendo la transmisión de energía de manera controlada. Utilizado solo en el molino de bolas.
- Rodamientos principales: Rodamientos de rodillo en rótula, que otorgan soporte y permiten la rotación del tambor del molino, conectándose a través de los muñones.
- Bastidores de rodamientos principales: Proveen soporte y posicionan los rodamientos, limitando el movimiento radial y axial.
- Motor de accionamiento auxiliar: En el molino de bolas, se emplea un motor hidráulico que convierte energía hidráulica en energía mecánica rotativa para transmitirla al reductor auxiliar. Por otro lado, el molino SAG opera con un motor eléctrico que transforma energía eléctrica en energía mecánica rotativa.
- Reductor de velocidad auxiliar: Caja de engranajes planetarios que reduce la velocidad y aumenta el torque proveniente del motor auxiliar. En el caso del molino de bolas, transmite esta energía al eje del piñón, mientras que en el molino SAG, hacia el reductor de velocidad principal.
- Conducto o pitón de alimentación: Cañería curva fundida de material resistente al desgaste que facilita el flujo de material hacia el interior del tambor del molino para su molienda.
- Chute de alimentación: Estructura de acero que soporta y posiciona el conducto de alimentación, con el propósito de dirigir el flujo de 1530 ton/día de material hacia el interior del molino.
- Revestimientos del muñón de alimentación: Carcasa insertada en el muñón, que brinda protección a la estructura interior y cuyo diámetro interno proporciona la superficie de montaje para los sellos de alimentación.
- Sello de alimentación: Sello de goma de labio doble purgado con agua que rodea el pitón de alimentación para evitar fugas de pulpa y mantener un ambiente sellado.

- Revestimiento del muñón de descarga: Manga de acero revestida de goma negra de 15 mm de espesor, sobre 6 mm de goma contrastante, que protege la superficie interior del muñón.
- Anillo de retención de bolas: Placa de hardox con ranuras para favorecer el paso de la pulpa y retener las bolas de acero, ubicado en el revestimiento del muñón de descarga.
- Trommel: Estructura de acero revestida con goma o poliuretano en el exterior, con paneles intercambiables de poliuretano en el interior, equipados con ranuras y espirales para la clasificación del material molido.
- Engrasado de rodamientos principales: Suministra grasa automáticamente para reducir la fricción, el desgaste, amortiguar las oscilaciones, prevenir la corrosión y disipar el calor durante la rotación de los rodamientos principales. Utiliza Molub-Alloy 860/460-2 de grasa lubricante.
- Rociado de grasa del conjunto de engranajes: Aplica grasa de manera intermitente y automática a los dientes del piñón y la corona para reducir la fricción y el desgaste durante su accionamiento. Utiliza Cepattyn KG 10 LC de grasa lubricante.
- Lubricación de la caja de engranajes y rodamientos del piñón: Suministra aceite continuamente para reducir la fricción y el desgaste entre las piezas móviles en el reductor de velocidad y los rodamientos. Utiliza ISO VG 220 de aceite lubricante.

4.3.2. Estados de falla

Los estados de falla se relacionan con la disfunción operativa de cada componente, lo que significa que cada función descrita tiene asociada una falla funcional específica, indicando qué aspecto no cumple cuando ocurre una falla.

La imagen 4.19 proporcionada muestra algunos componentes y sus respectivos estados de falla, con el propósito de ejemplificar el formato y el orden en que se presenta la información en el FMECA.

Componente	Estado de falla
Carcasa	1 No contiene la carga
	2 No es capaz de sostener los revestimientos
Cabezales	1 No brinda sello a los extremos del cilindro y no contiene la carga
	2 No es capaz de sostener los revestimientos
Muñones de los cabezales	1 No soporta el cilindro del molino
	2 No sostiene el rodamiento
Revestimiento o respaldo de goma	1 No protege la estructura interna del molino
	2 No es capaz de asentar los revestimientos de levante
Revestimiento de carcasa y cabezales	1 No protege el interior de la carcasa y cabezales
	2 No se genera el efecto de cascada y catarata
	3 No levanta carga
	4 No sostiene las placas de la carcasa y cabezales en su lugar
Motor principal	1 No transforma la energía o entrega menor potencia que 2500 kW
Corona	1 No transmite potencia mecánica al tambor
Piñón	1 No transmite potencia mecánica a la corona
Rodamientos del piñón	1 No soporta el eje del piñón
	2 No hay movimiento rotacional suave
Embrague de aire	1 No acopla ni desacopla la unión entre los elementos
Rodamientos principales	1 No soporta el cilindro del molino
	2 No hay movimiento rotacional
Bastidores de rodamientos principales	1 No soporta al rodamiento
	2 No mantiene la posición establecida
Motor de accionamiento auxiliar	1 No transforma la energía o entrega menor potencia
Reductor de velocidad auxiliar	1 No reduce la velocidad de giro a la requerida
Conducto o pitón de alimentación	1 No fluye fácilmente el material hacia el interior del molino
Chute de alimentación	1 No logra soportar el pitón
	2 No mantiene la posición correcta del ducto
	3 No alimenta el molino con un flujo de 1530 t/d

Figura 4.19: Extracto de la tabla de estados de falla de los componentes del molino de bolas. Elaboración propia.

4.3.3. Modos de falla

Dado el contexto operacional de los equipos y las funciones de cada componente, es necesario identificar los posibles modos de falla que puedan afectar su operación y dar lugar a los estados de falla previamente identificados. Para completar esta evaluación, se recopila información proveniente de los manuales de operación y control de los molinos ([30], [29], [35]), el historial de eventos de falla de la planta y datos de aplicaciones similares en la industria ([36], [37]).

Los modos de falla se analizan según su causa y mecanismo. En la figura 4.20, se presenta un ejemplo del orden aplicado para el registro de información que ilustra este proceso.

Componente	EF	Modo de falla		
		Causa	Mecanismo	
Carcasa	1	A Grietas o fisuras de las placas de la carcasa	1	Fatiga de las placas
			2	Sobrecarga de alimentación en el molino
			3	Desalineamiento del cilindro con el eje del molino
			4	Impactos en las placas de la carcasa
			5	Abrasión debido al material o al efecto de Pulp Racing*
			6	Desgaste de los revestimientos
			7	Corrosión
	B	1	Impactos en los revestimientos	
		2	Vibraciones excesivas	
		3	Corrosión	
		4	Fricción debido al movimiento rotativo del molino	
		5	Estrés excesivo por mal torque de pernos	
	2	A Desgaste, deformación o fractura de la estructura de la carcasa	1	Sobrecarga de alimentación en el molino
			2	Desalineamiento del cilindro con el eje del molino
			3	Impactos en la estructura de la carcasa
			4	Corrosión
			5	Abrasión debido al material o al efecto de Pulp Racing*
			6	Desgaste de los revestimientos
			7	Fatiga de la estructura de la carcasa

Figura 4.20: Extracto de la tabla de modos de falla de los componentes del molino de bolas. Elaboración propia.

En la tabla 4.20 se identifican los modos asociados a los estados de falla (EF) de la carcasa del molino de bolas. Uno de los mecanismos de falla identificados es el *pulp racing*, que corresponde al daño causado por la pulpa que fluye dentro de un surco lateral en contra de una pieza que no es de desgaste. Este fenómeno puede provocar un daño significativo en la carcasa del molino, los cabezales y los muñones. Un síntoma común de su presencia es la filtración en los flanges de las uniones, tal como se describe en el manual de operación.

4.3.4. Efectos de falla

Los efectos de falla proporcionan una visión detallada de lo que sucede cuando se presenta un modo de falla en el equipo, analizando sus efectos en diferentes niveles. Esto describe el efecto local, el efecto del siguiente nivel superior, el efecto final y el efecto potencial en el peor de los casos. Para ello, se parte del supuesto de que no existe un plan de mantenimiento actual, aunque se toman en cuenta los dispositivos de seguridad instalados. Este análisis se alinea con lo discutido en la sección 2.4.3.4.1 sobre efectos de falla.

Para mantener la coherencia con la estructura previa, se presenta la tabla 4.21 que detalla los efectos de falla asociados a la carcasa del molino de bolas. En esta tabla, se identifican los efectos de acuerdo a los modos de falla (MF) enumerados según sus causas.

Componente	EF	MF	Efectos de falla			
			Efecto local	Efecto del siguiente nivel superior	Efecto final	Efecto potencial en el peor de los casos
Carcasa	1	A	Fugas de agua o pulpa a través de las grietas, que deterioran el exterior de la carcasa, provocando corrosión y aumento de su tamaño hasta el eventual desprendimiento de la placa.	La carcasa pierde estructura, generando caída de revestimientos y pérdida de carga, lo que provoca desbalanceo del molino, aumenta las vibraciones en los rodamientos y engranajes causando desalineamiento y sobrecalentamiento. Esto activa interruptores de posición y temperatura, disparando la alarma.	El derrame de carga compromete la seguridad del personal y en la zona de cimientos. Se detiene el molino para el cambio de placas, revestimientos y alineamiento, implicando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	El fallo de la protección resultaría en el colapso catastrófico de los rodamientos, piñón y corona, provocando la avería del motor por el desalineamiento y aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.
		B	La unión del perno pierde integridad, presentando fugas de agua o pulpa, provocando corrosión en la carcasa y que se suelten los revestimientos hasta su desprendimiento.	El desprendimiento del revestimiento genera desequilibrio en el molino, aumentando el desgaste de otros revestimientos, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se propaga la corrosión, aumentando las fugas, aumentan las vibraciones, afectando los rodamientos y engranajes, causando desalineación, elevando las temperaturas, lo que activa interruptores y alarmas.	El derrame de carga compromete la seguridad del personal y en la zona de cimientos. Se detiene el molino para el cambio de revestimientos, placas y empaquetaduras, implicando costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	El fallo de la protección resultaría en el colapso catastrófico de los rodamientos, piñón y corona, provocando la avería del motor por el desalineamiento y aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.
		A	El desgaste y deformación de la carcasa generan soltura y desalineamiento de juntas y revestimientos, presentando fugas de agua o pulpa en juntas, sellos y fracturas de la carcasa, que corroen la estructura y sujeciones, llegando incluso al desprendimiento de los revestimientos.	Se genera desbalanceo en el molino, lo que incrementa el desgaste de la carcasa, sujeciones y revestimientos, resultando en un aumento de fugas, reduciendo la eficiencia de molienda y calidad del producto, además de aumentar las vibraciones afectando a los rodamientos y engranajes, provocando su desalineamiento y aumento de temperaturas, lo que activa los interruptores y alarmas de posición y temperatura.	El derrame de carga compromete la seguridad del personal y en la zona de cimientos. Se detiene la producción para el cambio de revestimientos, sellos y placas de la carcasa, implicando costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	El fallo de la protección resultaría en el colapso catastrófico de los rodamientos, piñón y corona, provocando la avería del motor por el desalineamiento y aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.

Figura 4.21: Extracto de la tabla de efectos de falla de los componentes del molino de bolas. Elaboración propia.

4.3.5. Consecuencias y riesgos de falla

Basándose en la descripción de los efectos, se examinan las potenciales amenazas que representan las fallas. Este proceso se rige por la tabla de riesgo presentada en la figura 4.23, donde se detallan los criterios que delimitan cada nivel, clasificados del 1 al 5, siendo 5 el más crítico. Asimismo, se evalúa la probabilidad de fallo en una escala del 1 al 5, con 5 la mayor eventualidad, determinada por la presencia de fallos registrados y la posibilidad de que ocurran en un período de tiempo específico. Para calcular el riesgo, se cruzan estos valores de probabilidad con el impacto más significativo de los parámetros estudiados, obteniendo su criticidad según se muestra en la tabla 4.15.

Tabla 4.15: Clasificación del grado de riesgo de la matriz.

Riesgo	
1 - 5	Bajo (tolerable)
6 - 12	Medio (tolerable)
13 - 20	Alto (intolerable)
21 - 25	Extremo (intolerable)

Los resultados se ingresan en una tabla ordenados según el componente, el estado de falla y la causa o modo correspondiente. En la siguiente imagen 4.22 se presenta un extracto de los resultados del molino de bolas, apuntando los datos de probabilidad (P), impacto en la salud y seguridad (SS), ambiental (MA), operacional de los activos (OPA), operacional con consecuencias en el ámbito legal y regulatorio (OPL), operacional social (OPS), consecuencia (con) y riesgo. La información completa para cada molino se puede revisar en el Anexo C.

Molino de bolas													
Componente	Estado de falla	Causa	P	SS	MA	OPA	OPL	OPS	Con	Riesgo	T rep [H]	C mnto [USD]	PI [TMS]
1	1	A	1	4	4	1	4	2	4	10	18,15	16379,78	181,69
		B	3	2	3	1	2	1	3	13	6,78	3175,03	67,91
	2	A	2	4	4	1	4	2	4	14	18,15	16379,78	181,69
2	1	A	4	2	3	5	2	1	5	24	445,54	25572,32	4460,20
		B	1	3	3	5	3	2	5	15	18,15	154073,91	181,69
		C	3	5	4	5	5	2	5	22	18,15	154073,91	181,69
		D	3	2	3	1	2	1	3	13	6,78	5454,48	67,91
	2	A	2	4	4	5	4	2	5	19	18,15	154073,91	181,69
3	1	A	2	5	4	3	5	2	5	19	3,75	58893,96	37,54
	2	A	2	4	4	3	4	2	4	14	3,75	58893,96	37,54
B		4	3	3	5	3	1	5	24	445,54	30256,50	4460,20	
4	1 Y 2	A	2	3	3	4	3	1	4	14	9,87	118843,32	98,77

Figura 4.22: Extracto de la tabla de riesgo de los componentes del molino de bolas. Elaboración propia.

Para establecer la probabilidad de falla de los modos identificados, se revisan los registros de eventos de la planta, desde el año 2019 hasta el 2023, cuantificando la recurrencia de estas si se han presentado. En caso de ausencia de registros específicos, se realiza una aproximación en función de características similares dentro del contexto operacional de los molinos, utilizando documentos de aplicación análoga y siguiendo una lógica de criterios acorde con el entorno operativo de los equipos. En la tabla de riesgos 4.22, se destacan en color gris aquellos modos de falla no evidenciados en la empresa, siguiendo el principio descrito.

En relación a los tipos de consecuencia o pérdidas, en el área de salud y seguridad del personal, se vuelve relevante estudiar los riesgos derivados del contacto con el material. La escoria contiene cobre, azufre, hierro, magnetita y dióxido de silicio. Algunos de estos componentes pueden ser irritantes o tóxicos para la piel, los ojos o el sistema respiratorio en contacto directo o inhalación de los vapores. Lo mismo sucede con los lubricantes, ya sean grasa o aceite. En situaciones de fallas como fugas, derrames, contacto eléctrico, incendios o caída de objetos, se incrementa el riesgo de caídas, impactos, aplastamientos y quemaduras, con la posibilidad de causar la muerte.

Respecto al impacto ambiental, se indaga sobre la emisión de gases, partículas y polvos en caso de liberación de material, incendios y derrames, así como la toxicidad y efectos adversos al entrar en contacto con el suelo y fuentes de agua.

En términos operacionales, todas las fallas conducen a la detención del molino y la planta, que se estima mediante la pérdida de producción por inactividad (PI en la tabla) en TMS y el costo de mantenimiento de la falla registrada (C mto) en USD. Para ello, se recurre nuevamente al registro de fallas, buscando los tiempos de reparación documentados (T rep) en horas, y junto con la producción media anual de la planta, convertida a horas trabajadas, se determina la producción perdida durante el tiempo de inactividad utilizando una regla de tres. Si se evidencian múltiples fallas de similar naturaleza, el cálculo del tiempo de reparación y costo de mantenimiento se realiza mediante el promedio de dichas fallas.

En el caso de las consecuencias operacionales con implicaciones legales y regulatorias, se tienen en cuenta las regulaciones, leyes y estándares descritos en la sección 4.2.5.3, y se evalúa cómo una falla podría transgredir dichas normativas.

Finalmente, para el impacto operacional con repercusiones sociales, se analiza cómo la falla afectaría la calidad de vida en el entorno, considerando aspectos como el medio ambiente, la salud, los ruidos, la seguridad, la visibilidad de los efectos de la falla y su magnitud.

Tipo de consecuencia o pérdida		1 Insignificante	2 Menor	3 Moderado	4 Alto	5 Extremo
Salud y seguridad		Caso de primeros auxilios o exposición a riesgo menor para la salud	Caso de tratamiento médico o exposición mayor para la salud	Lesión con licencia médica o impacto reversible en la salud	Muerte única, pérdida de calidad de vida o impacto irreversible en la salud	Múltiples muertes o impacto en la salud que en última instancia provocan la muerte
Ambiental		Daño ambiental mínimo	Daño ambiental menor de reparación a corto plazo	Daño ambiental grave con impacto irreversible durante la vida vegetal	Daño ambiental crítico con impacto irreversible después de la vida vegetal	Daño ambiental extremo con impacto irreversible
Operacional (Activos)		Sin interrupción de operaciones, o una pérdida de producción menor a 500 TMS y/o un costo de mantenimiento inferior a USD 25000	Breve interrupción de las operaciones, o una pérdida de producción entre 500 y 1000 TMS y/o un costo de mantenimiento entre USD 25000 y 50000	Parada parcial, o una pérdida de producción entre 1000 y 2000 TMS y/o un costo de mantenimiento entre USD 50000 y 80000	Pérdida parcial de las operaciones, o una pérdida de producción entre 2000 y 4000 TMS y/o un costo de mantenimiento entre USD 80000 y 120000	Pérdida sustancial de las operaciones, o una pérdida de producción mayor a 4000 TMS y/o un costo de mantenimiento superior a USD 120000
Operacional (Legal y regulatorio)		Problema legal de bajo nivel	Problema legal menor, infracción o incumplimiento de regulación	Incumplimiento grave de regulación, investigación e informe a la autoridad, procesamiento y/o posible sanción menor	Incumplimiento grave de la normativa, procesamientos y sanciones considerables	Sanciones y procesamientos muy graves, múltiples demandas y posibles consecuencias penales
Operacional (Reputación, social, comunidad)		Puede existir un ligero impacto o consecuencia pública pero no alerta pública	Impacto limitado, preocupación pública local	Impacto considerable, preocupación pública regional	Impacto grave, preocupación pública nacional	Impacto extremo, preocupación pública internacional
Probabilidad		Análisis de riesgo				
5	El evento de falla ocurrió frecuentemente, una o más veces al año y es probable que suceda dentro de 1 año	11	16	20	23	25
4	El evento de falla ocurrió con poca frecuencia, menos de una vez al año y es probable que suceda dentro de 5 años	7	12	17	21	24
3	El evento de falla ocurrió algunas veces y podría suceder dentro de 10 años	4	8	13	18	22
2	El evento de falla ocurrió algunas veces y podría suceder dentro de 20 años	2	5	9	14	19
1	El evento de falla nunca ha ocurrido y no es probable que suceda dentro de 20 años	1	3	6	10	15

Figura 4.23: Matriz de riesgo de evaluación de los modos de falla de los molinos. Elaboración propia.

4.3.6. Diagrama FMECA

Para asegurar una organización y presentación clara del contenido, se elabora el diagrama siguiendo la estructura de la hoja de información descrita en el documento de referencia [14]. Debido a su extensión, las tablas completas de ambos molinos se encuentran disponibles para su revisión en los Anexos D y E.

4.3.7. Criticidad de los modos de falla

La matriz de riesgo revela la presencia de 13 modos críticos dentro del rango de amenaza extrema para cada molino, los que requieren de atención urgente y tratamiento para reducir el riesgo a un nivel tolerable. Sin embargo, debido a la extensión del análisis, solo se seleccionan tres modos críticos por equipo.

La decisión sobre qué modos de falla atender se sustenta principalmente en el valor directo del riesgo, favoreciendo aquellos con resultados más elevados. No obstante, como se indicó previamente, no se dispone de registros de falla para todos los modos identificados, por lo que se da prioridad a aquellos con antecedentes documentados. Además, se comparan las cifras individuales de impacto de los criterios evaluados en la matriz de riesgo.

En definitiva, se seleccionaron los siguientes modos críticos de falla, tabla 4.16.

Tabla 4.16: Modos de falla críticos seleccionados. Elaboración propia.

Equipo	Componente	Modo de falla	
Molino de bolas	Cabezales	1	Desalineamiento del cabezal con el muñón y carcasa
	Revestimientos de levante de la carcasa y cabezales	2	Desgaste o fractura de los revestimientos
	Rodamientos principales	3	Lubricación insuficiente
Molino SAG	Cabezales	4	Desgaste o fractura de la unión con la carcasa y el muñón
	Revestimiento de desgaste de la carcasa	5	Desgaste, rotura, deformación o desprendimiento del respaldo
	Motor principal	6	Falla en el variador de frecuencia

4.4. Análisis Causa Raíz de modos de falla críticos

Cada modo de falla tiene una causa subyacente que puede desencadenar otras fallas subsecuentes. Identificarlas permite corregir y prevenir la evolución de la falla antes de que ocurra. Para ello, se utiliza la metodología PROACT.

En las siguientes secciones se presenta el análisis de cada modo de falla crítico. Se desarrolla la metodología PROACT comenzando con la definición del problema, objetivos, impacto y descripción, seguido por la aplicación de las técnicas de análisis causa raíz: diagrama causa-efecto y árbol lógico de falla. Con ello, se escogen dos posibles causas para aplicar los cinco porqués y profundizar el estudio.

La recopilación de antecedentes se aborda mediante la revisión de registros de fallas y documentos específicos de los componentes. Se buscan referencias en catálogos y se recopila información sobre las fallas más comunes ([38], [39], [40], [41]). Dado que la descripción del incidente no es precisa debido a la falta de información en los registros, se complementa con supuestos sobre lo que podría haber sucedido.

4.4.1. Molino de bolas

4.4.1.1. Desalineamiento del cabezal con el muñón y carcasa

En la tabla 4.17 se muestran los puntos de inicio para el desarrollo del análisis.

Tabla 4.17: PROACT: Descripción del desalineamiento del cabezal con el muñón y carcasa. Elaboración propia.

Problema	Desalineamiento del cabezal con el muñón y la carcasa.
Objetivo	Eliminar o reducir su ocurrencia y riesgo a un nivel tolerable, desarrollando estrategias y procedimientos sostenibles en el tiempo, mejorando la confiabilidad del molino.
Impacto	<i>Salud y seguridad:</i> Aumento de ruido, fugas de lubricante y pulpa de baja a mediana envergadura y peligro de daños eléctrico, causando riesgos de caídas, electrocución, quemaduras, irritación ocular, cutánea y en el tracto respiratorio, con posibilidad de lesiones moderadas reversibles. <i>Ambiente:</i> Contaminación del suelo, grave pero reversible. <i>Operacional:</i> Detención prolongada de 446h de inactividad por reparaciones, costo de mantenimiento de 25572 USD, pérdida de producción de 4460 TMS y problema legal menor.
Descripción	Durante la operación se detectó un incremento anormal en el nivel de ruido y vibración del molino, con presencia de manchas de aceite y pulpa en varios puntos, procediendo a detener el equipo. Se inspeccionó en búsqueda del problema, descubriendo pernos sueltos en el cabezal y que el molino estaba desalineado.

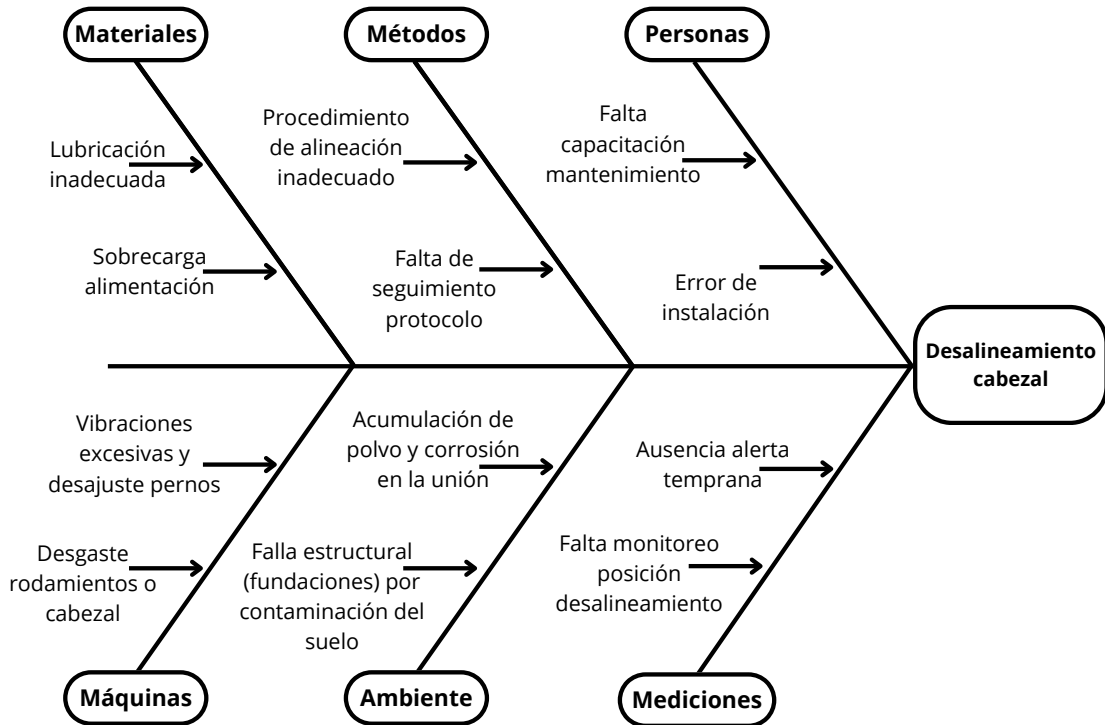


Figura 4.24: Diagrama causa efecto para el desalineamiento del cabezal con el muñón y carcasa. Elaboración propia.

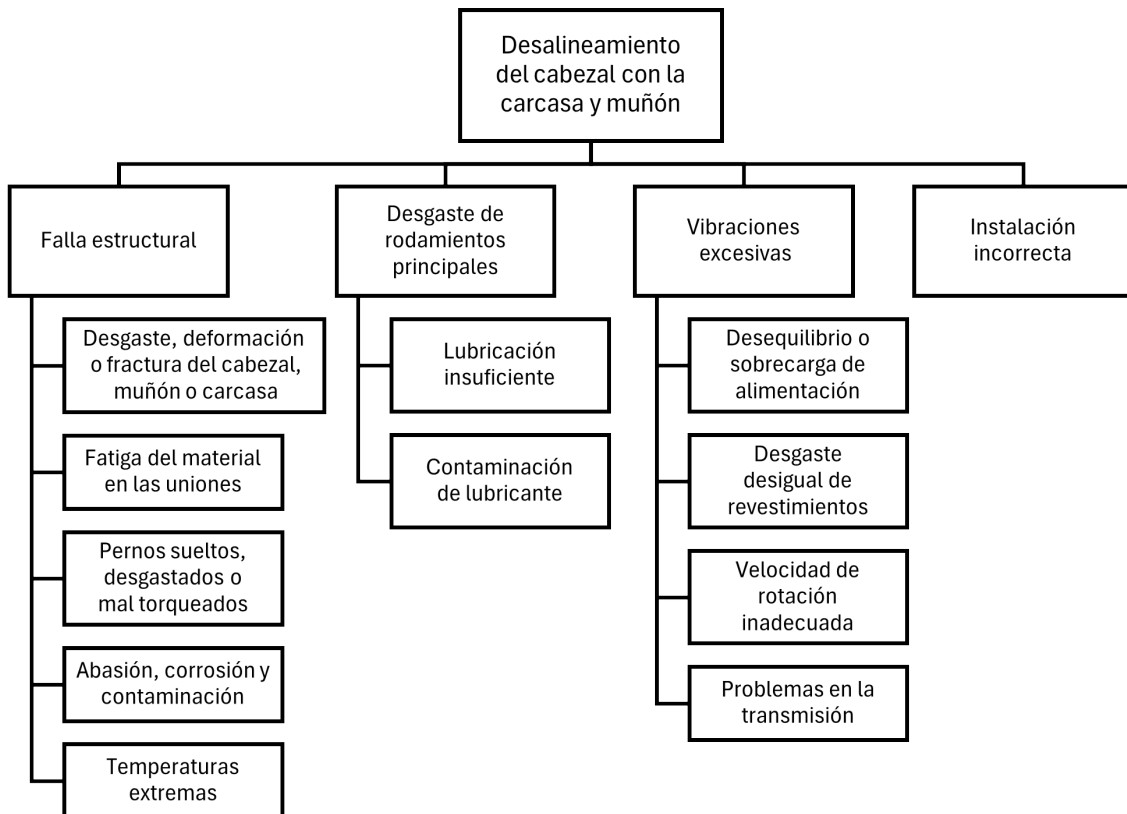


Figura 4.25: 3rbol l3gico de falla para el desalineamiento del cabezal con el muñ3n y carcasa. Elaboraci3n propia.

De ambos diagramas 4.24 y 4.25, se puede deducir que la falla principal radica en el desgaste de los rodamientos principales y vibraciones excesivas.

Problema	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?
Desgaste de rodamientos principales	Lubricación insuficiente o degradación del lubricante	Falla en el sistema de lubricación	Procedimiento de mantenimiento inadecuado	Falta regularidad, capacitación o aspectos a mantener	Falta de seguimiento
Vibraciones excesivas	Desequilibrio o sobrecarga de alimentación	Desregulación del sistema de alimentación	Sensores o controles defectuosos o mal calibrados	Procedimiento de mantenimiento inadecuado	Falta regularidad, capacitación o procedimiento establecido

Figura 4.26: Diagrama de los cinco porqués para el desalineamiento del cabezal con el muñón y carcasa. Elaboración propia.

4.4.1.2. Desgaste o fractura de los revestimientos de levante

En la tabla 4.18 se muestran los puntos de inicio para el desarrollo del análisis.

Tabla 4.18: PROACT: Descripción del desgaste o fractura de los revestimientos de levante. Elaboración propia.

Problema	Desgaste o fractura de los revestimientos de levante.
Objetivo	Eliminar o reducir su ocurrencia y riesgo a un nivel tolerable, desarrollando estrategias y procedimientos sostenibles en el tiempo, mejorando la confiabilidad del molino.
Impacto	<p><i>Salud y seguridad:</i> Aumento de ruido y fugas menores de pulpa por fisuras en la carcasa, causando riesgo de irritación ocular, cutánea y en el tracto respiratorio, con posibilidad de lesiones leves y reversibles.</p> <p><i>Ambiente:</i> Daño mínimo.</p> <p><i>Operacional:</i> Detención de 38h de inactividad por reparaciones, costo de mantenimiento de 80356 USD, pérdida de producción de 383 TMS y problema legal menor.</p>
Descripción	Durante la operación se detectó un aumento considerable de ruido y vibraciones, con presencia de soltura de pernos de los revestimientos y fugas, acompañado de un rendimiento de molienda deficiente, procediendo a detener el molino. Al inspeccionar visualmente el interior del molino, se observó un desgaste considerable en los revestimientos de levante de la carcasa, así como signos evidentes de fracturas.

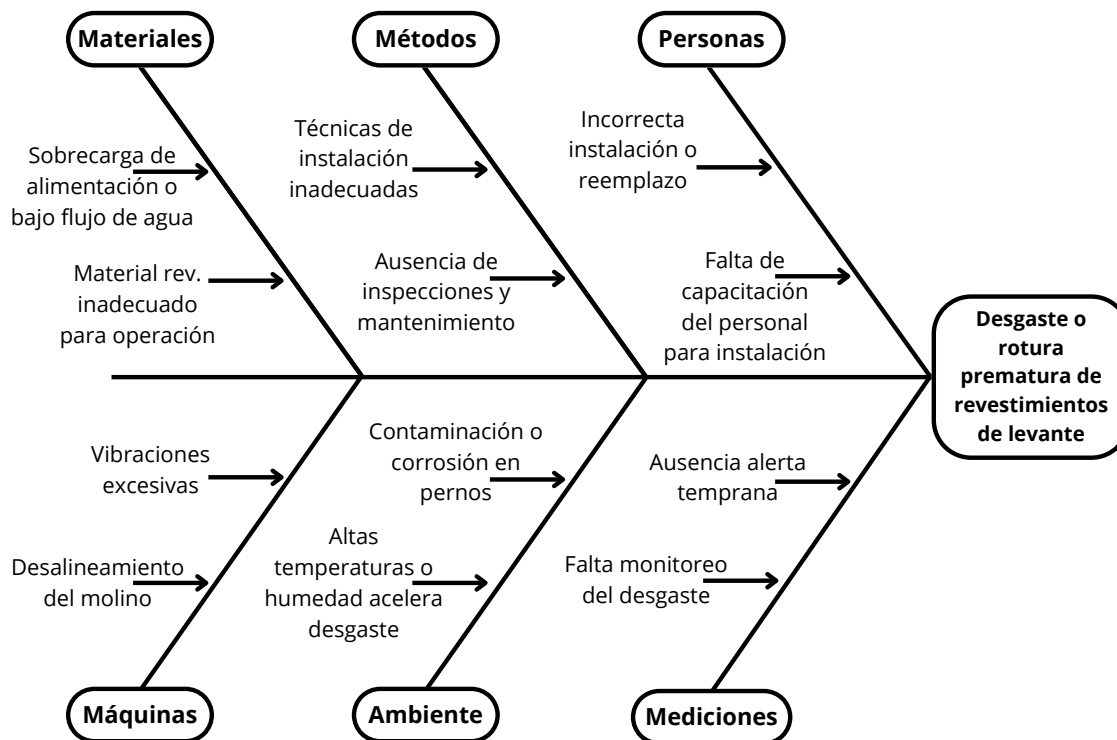


Figura 4.27: Diagrama causa efecto para el desgaste o fractura de los revestimientos de levante. Elaboración propia.

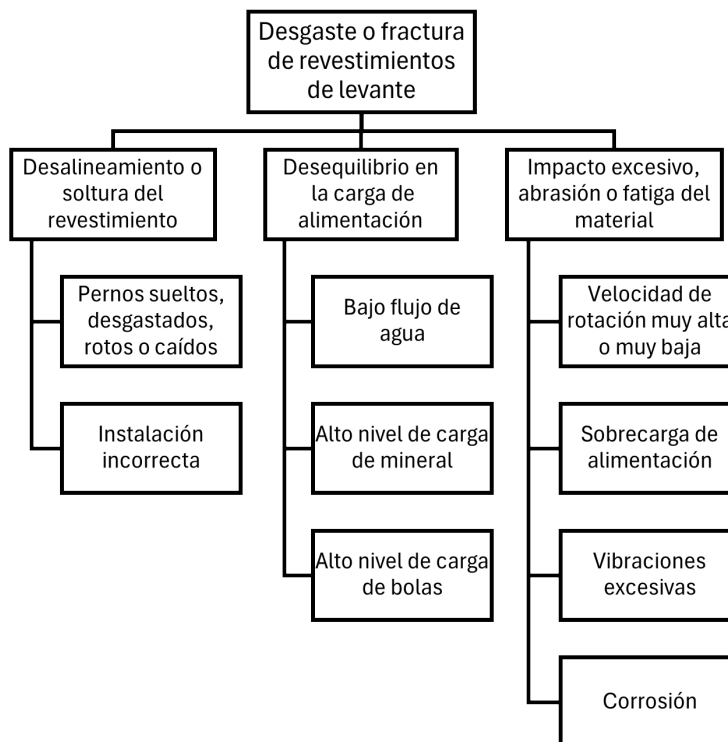


Figura 4.28: Árbol lógico de falla para el desgaste o fractura de los revestimientos de levante. Elaboración propia.

De ambos diagramas 4.27 y 4.28, se puede deducir que la falla principal radica en el desalineamiento o soldadura de revestimientos y el impacto excesivo, abrasión o fatiga del material de los revestimientos.

Problema	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?
Desalineamiento o soldadura de revestimientos	Pernos sueltos, rotos, caídos o mal torquados	Procedimiento de mantenimiento inadecuado	Falta de regularidad, capacitación o aspectos a mantener	Falta de seguimiento	Importancia a otros aspectos de mantenimiento
Impacto excesivo, abrasión o fatiga del material	Desequilibrio, sobrecarga de alimentación o bajo flujo de agua	Desregulación del sistema de alimentación	Sensores o controles defectuosos o mal calibrados	Procedimiento de mantenimiento inadecuado	Falta regularidad, capacitación o procedimiento establecido

Figura 4.29: Diagrama de los cinco porqués para el desgaste o fractura de los revestimientos de levante. Elaboración propia.

4.4.1.3. Lubricación insuficiente de rodamientos principales

En la tabla 4.19 se muestran los puntos de inicio para el desarrollo del análisis.

Tabla 4.19: PROACT: Descripción de lubricación insuficiente de rodamientos principales. Elaboración propia.

Problema	Lubricación insuficiente de rodamientos principales.
Objetivo	Eliminar o reducir su ocurrencia y riesgo a un nivel tolerable, desarrollando estrategias y procedimientos sostenibles en el tiempo, mejorando la confiabilidad del molino.
Impacto	<p><i>Salud y seguridad:</i> Aumento de ruido, sobrecalentamiento, ruptura del rodamiento, derrame de lubricante y generación de vapores tóxicos, causando riesgos de impactos o golpes, caídas, quemaduras, irritación ocular, cutánea y en el tracto respiratorio, con posibilidad de lesiones graves e incluso muerte.</p> <p><i>Ambiente:</i> Contaminación del suelo y aire, grave e incluso irreversible.</p> <p><i>Operacional:</i> Detención de 51h de inactividad por reparaciones, costo de mantenimiento de 9899 USD, pérdida de producción de 515 TMS e incumplimiento grave a la normativa.</p>
Descripción	Durante la operación se detectó un incremento de ruido, vibración y temperatura en el rodamiento, procediendo a detener el molino. Tras una inspección, se observó que los rodamientos presentaban signos de desgaste prematuro y bajo nivel de lubricante.

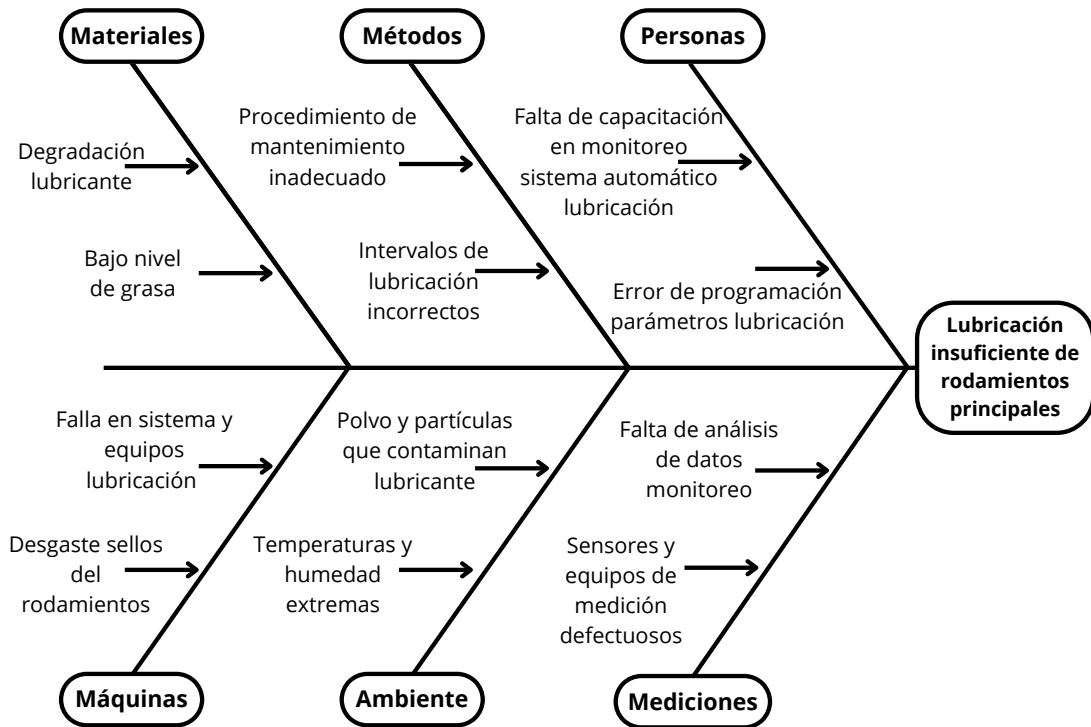


Figura 4.30: Diagrama causa efecto para lubricación insuficiente de rodamientos principales. Elaboración propia.

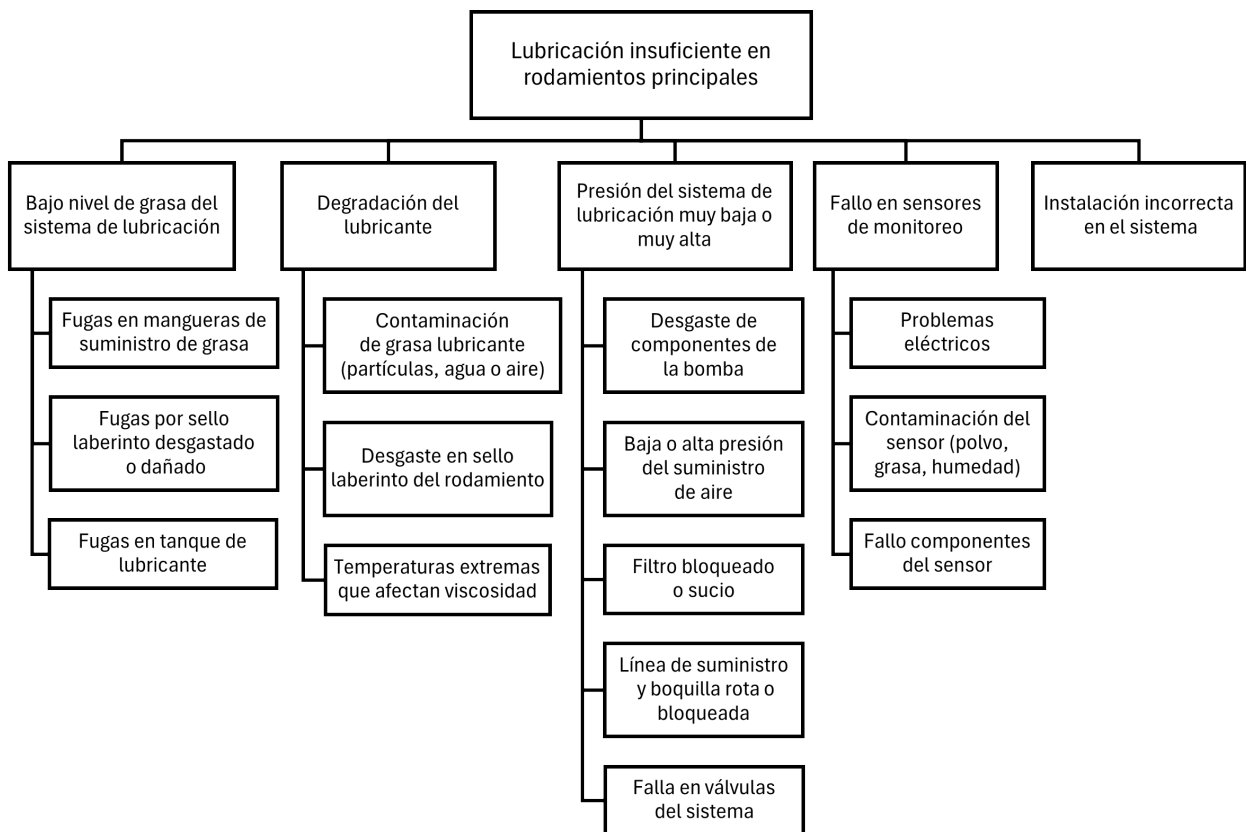


Figura 4.31: Árbol lógico de falla para lubricación insuficiente de rodamientos principales. Elaboración propia.

De ambos diagramas 4.30 y 4.31, se puede deducir que la falla principal radica en que la bomba del sistema de lubricación no funciona correctamente y la presencia de fugas en mangueras de suministro o sellos del sistema.

Problema	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?
Bomba no funciona correctamente	Desgaste de componentes de la bomba	Procedimiento de mantenimiento inadecuado	Falta de regularidad, capacitación o aspectos a mantener	Falta de seguimiento	Importancia a otros aspectos de mantenimiento
Fugas en las mangueras de suministro y sellos	Desgaste y envejecimiento de los componentes	Falta de regularidad en reemplazos o mantenimiento	Programa de mantenimiento débil o inadecuado	Falta de seguimiento	Falta de recursos, formación o atención a recomendaciones

Figura 4.32: Diagrama de los cinco porqués para lubricación insuficiente de rodamientos principales. Elaboración propia.

4.4.2. Molino SAG

4.4.2.1. Desgaste o fractura de la unión del cabezal con la carcasa y muñón

En la tabla 4.20 se muestran los puntos de inicio para el desarrollo del análisis.

Tabla 4.20: PROACT: Descripción del desgaste o fractura de la unión del cabezal con la carcasa y muñón. Elaboración propia.

Problema	Desgaste o fractura de la unión del cabezal con la carcasa y el muñón.
Objetivo	Eliminar o reducir su ocurrencia y riesgo a un nivel tolerable, desarrollando estrategias y procedimientos sostenibles en el tiempo, mejorando la confiabilidad del molino.
Impacto	<p><i>Salud y seguridad:</i> Proyecciones de fragmentos, falla estructural, fugas de lubricante y pulpa de mediana a gran envergadura y peligro de daño eléctrico, causando riegos de impactos o golpes, aplastamientos, atrapamientos, caídas, electrocución, quemaduras, irritación ocular, cutánea y en el tracto respiratorio, con posibilidad de lesiones graves e incluso muerte.</p> <p><i>Ambiente:</i> Contaminación del suelo, grave e incluso irreversible.</p> <p><i>Operacional:</i> Detención de 18h de inactividad por reparaciones, costo de mantenimiento de 154074 USD, pérdida de producción de 182 TMS e incumplimiento grave a la normativa.</p>
Descripción	Durante la operación se detectó un aumento en el nivel de ruido y vibraciones inusuales provenientes de la zona del cabezal, con presencia de fugas, procediendo a detener el molino. Posteriormente, se identificó visualmente una fisura o fractura en la unión entre el cabezal y la carcasa.

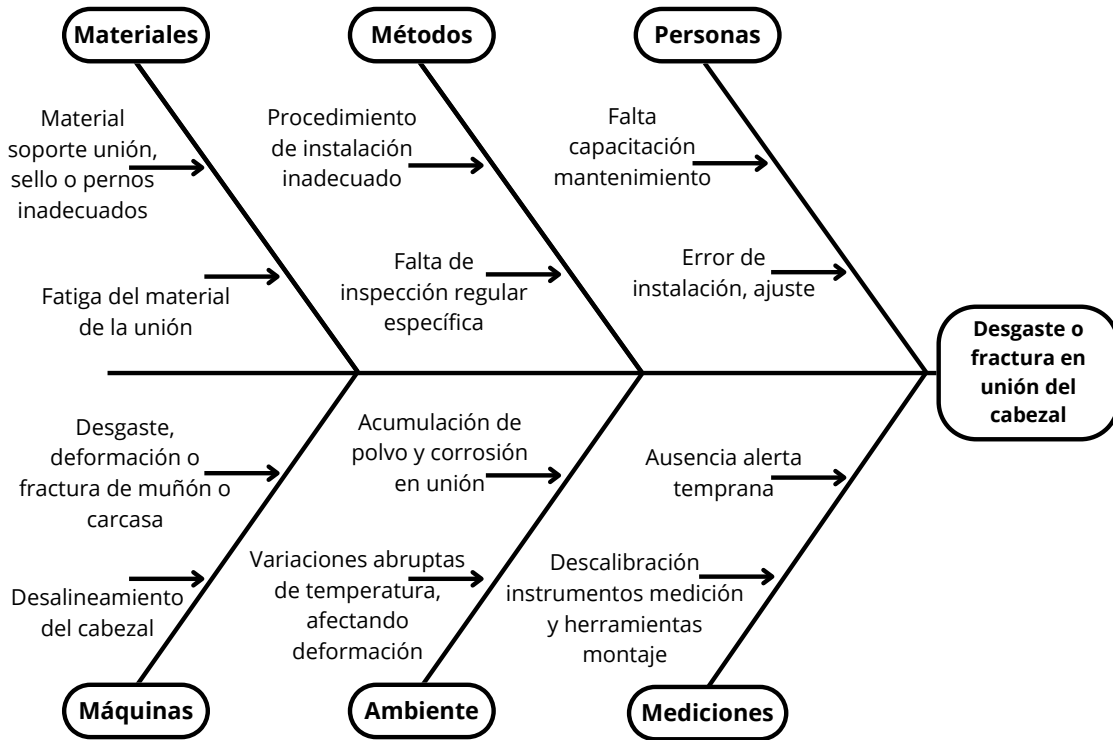


Figura 4.33: Diagrama causa efecto para el desgaste o fractura de la unión del cabezal con la carcasa y muñón. Elaboración propia.

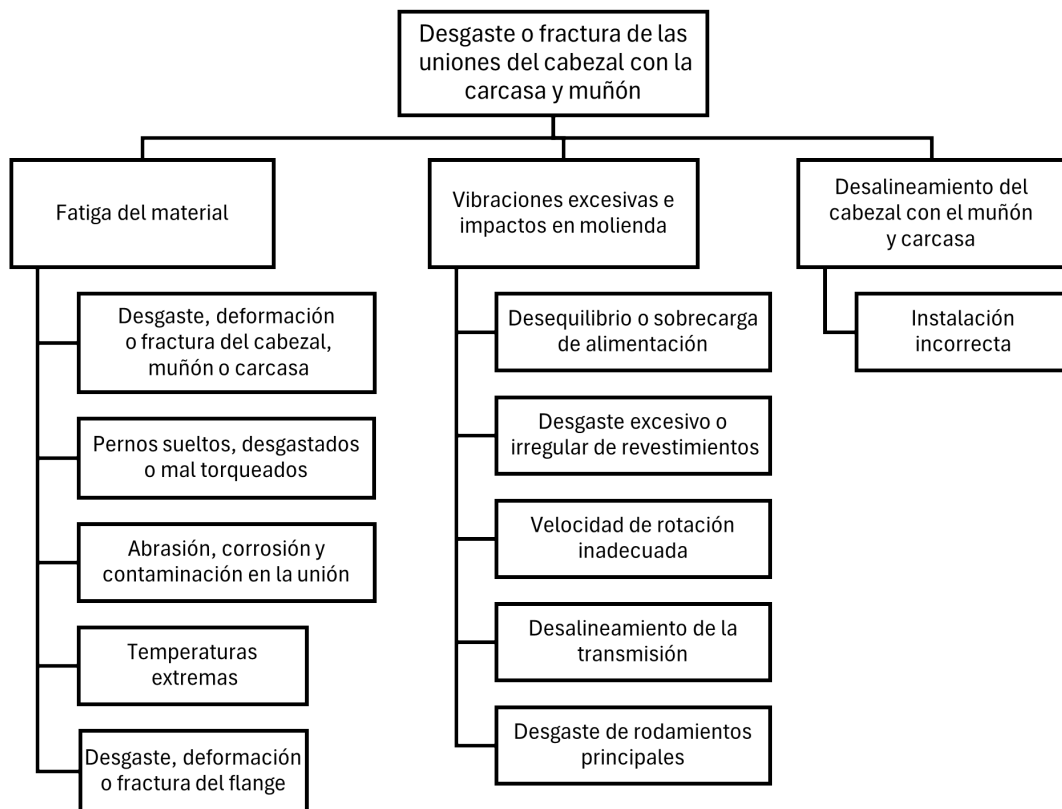


Figura 4.34: Árbol lógico de falla para el desgaste o fractura de la unión del cabezal con la carcasa y muñón. Elaboración propia.

De ambos diagramas 4.33 y 4.34, se puede deducir que la falla principal radica en el desalineamiento del cabezal y la fatiga del material en las uniones del cabezal con el muñón y carcasa.

Problema	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?
Desalineamiento del cabezal con el muñón y carcasa	Desgaste de rodamientos principales	Lubricación insuficiente o degradación del lubricante	Falla en el sistema de lubricación	Procedimiento de mantenimiento inadecuado	Falta regularidad, capacitación o aspectos a mantener
Fatiga del material en la unión	Vibraciones excesivas	Desequilibrio o sobrecarga de alimentación	Desregulación del sistema de alimentación	Sensores o controles defectuosos o mal calibrados	Procedimiento de mantenimiento inadecuado

Figura 4.35: Diagrama de los cinco porqués para el desgaste o fractura de la unión del cabezal con la carcasa y muñón. Elaboración propia.

4.4.2.2. Desgaste, rotura, deformación o desprendimiento del respaldo

En la tabla 4.21 se muestran los puntos de inicio para el desarrollo del análisis.

Tabla 4.21: PROACT: Descripción del desgaste, rotura, deformación o desprendimiento del respaldo. Elaboración propia.

Problema	Desgaste, rotura, deformación o desprendimiento del respaldo.
Objetivo	Eliminar o reducir su ocurrencia y riesgo a un nivel tolerable, desarrollando estrategias y procedimientos sostenibles en el tiempo, mejorando la confiabilidad del molino.
Impacto	<p><i>Salud y seguridad:</i> Exposición de la carcasa a desgaste, deformación o fractura, provocando fugas de pulpa de mediana envergadura, proyección de fragmentos, peligro de daño eléctrico y aumento de ruido, causando riesgos de impactos o golpes, caídas, electrocución, quemaduras, irritación ocular, cutánea y en el tracto respiratorio, con posibilidad de lesiones graves reversibles.</p> <p><i>Ambiente:</i> Contaminación del suelo, e incluso irreversible.</p> <p><i>Operacional:</i> Detención de 25h de inactividad por reparaciones, costo de mantenimiento de 87779 USD, pérdida de producción de 246 TMS e incumplimiento grave de regulación.</p>
Descripción	Durante la operación se detectó ruido metálico inusual, aumento de vibraciones y reducción de la eficiencia molienda, procediendo a detener el molino. Durante la inspección se observó presencia de pequeñas fugas en fisuras de la carcasa y reducción en la eficiencia de molienda.

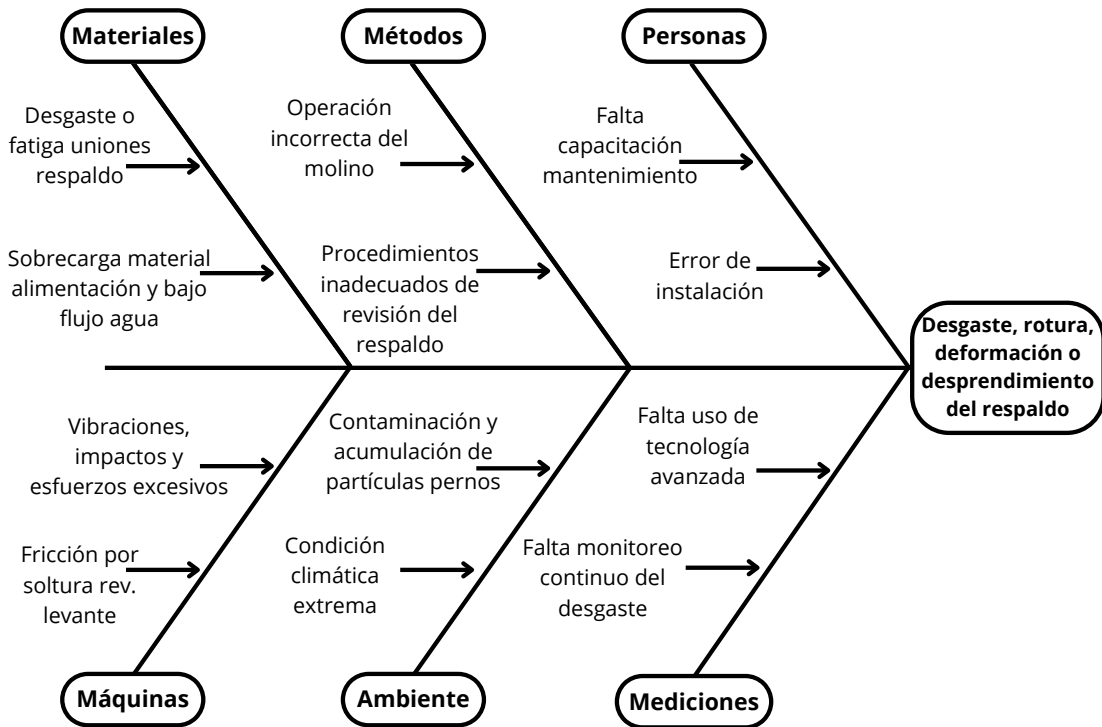


Figura 4.36: Diagrama causa efecto para el desgaste, rotura, deformación o desprendimiento del respaldo. Elaboración propia.

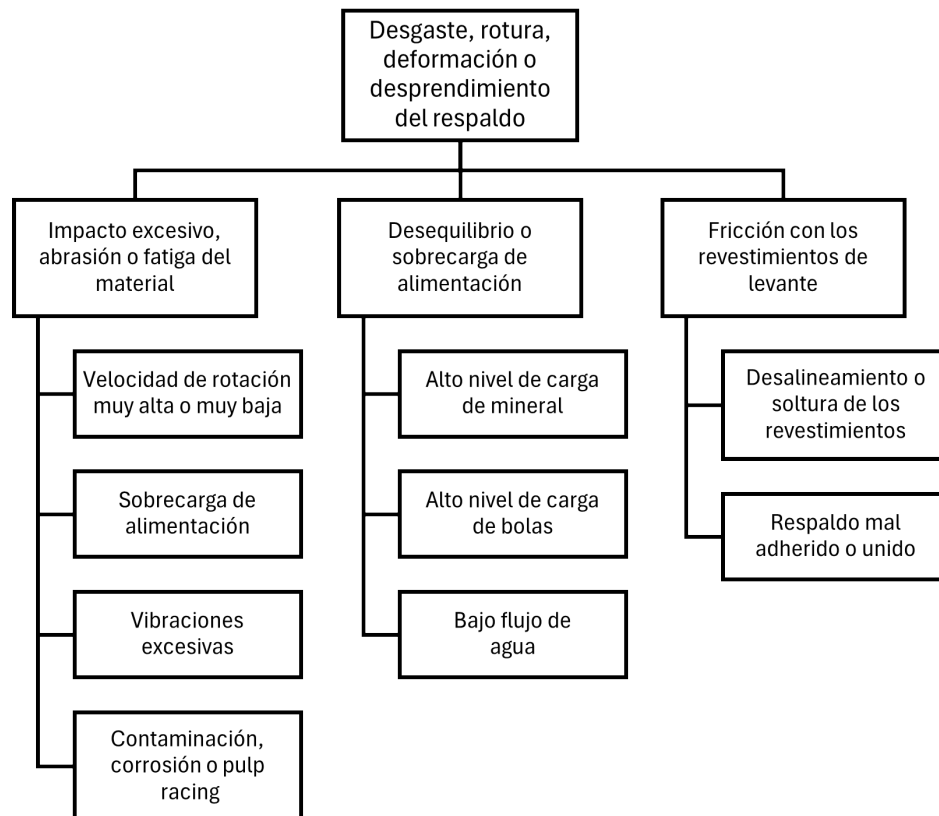


Figura 4.37: Árbol lógico de falla para el desgaste, rotura, deformación o desprendimiento del respaldo. Elaboración propia.

De ambos diagramas 4.36 y 4.37, se puede deducir que la falla principal radica en el impacto excesivo, abrasión o fatiga del material de las uniones del cabezal con la carcasa y muñón, y la fricción del respaldo debido a la soldadura de los revestimientos de levante.

Problema	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?
Impacto excesivo, abrasión o fatiga del material	Desequilibrio, sobrecarga de alimentación o bajo flujo de agua	Desregulación del sistema de alimentación	Sensores o controles defectuosos o mal calibrados	Procedimiento de mantenimiento inadecuado	Falta regularidad, capacitación o procedimiento establecido
Fricción por soldadura de revestimientos de levante	Pernos sueltos, rotos, caídos o mal torquados	No se siguieron los procedimientos de instalación	Falta de regularidad, capacitación o información	Falta de seguimiento	Importancia a otros aspectos de mantenimiento

Figura 4.38: Diagrama de los cinco porqués para el desgaste, rotura, deformación o desprendimiento del respaldo. Elaboración propia.

4.4.2.3. Falla en el variador de frecuencia

En la tabla 4.22 se ordenan los puntos de inicio para el desarrollo del análisis.

Tabla 4.22: PROACT: Descripción de Falla en el variador de frecuencia. Elaboración propia.

Problema	Falla en el variador de frecuencia.
Objetivo	Eliminar o reducir su ocurrencia y riesgo a un nivel tolerable, desarrollando estrategias y procedimientos sostenibles en el tiempo, mejorando la confiabilidad del molino.
Impacto	<p><i>Salud y seguridad:</i> Problemas eléctricos, descontrol del giro del molino, sobrecalentamiento con peligros de incendio, causando electrocución, quemaduras, problemas respiratorios por inhalación de humo tóxico y atrapamientos, con posibilidad de lesiones graves e incluso muerte.</p> <p><i>Ambiente:</i> Emisiones de gas tóxico, grave e incluso irreversible.</p> <p><i>Operacional:</i> Detención de 0.46h de inactividad por reparaciones, costo de mantenimiento de 5477 USD, pérdida de producción de 5 TMS e incumplimiento grave a la normativa.</p>
Descripción	Durante la operación se detectó una pérdida repentina de control en la velocidad del motor principal. Los indicadores del panel de control mostraron una lectura anormal de la frecuencia de salida del variador y sobrecalentamiento, activándose las alarmas.

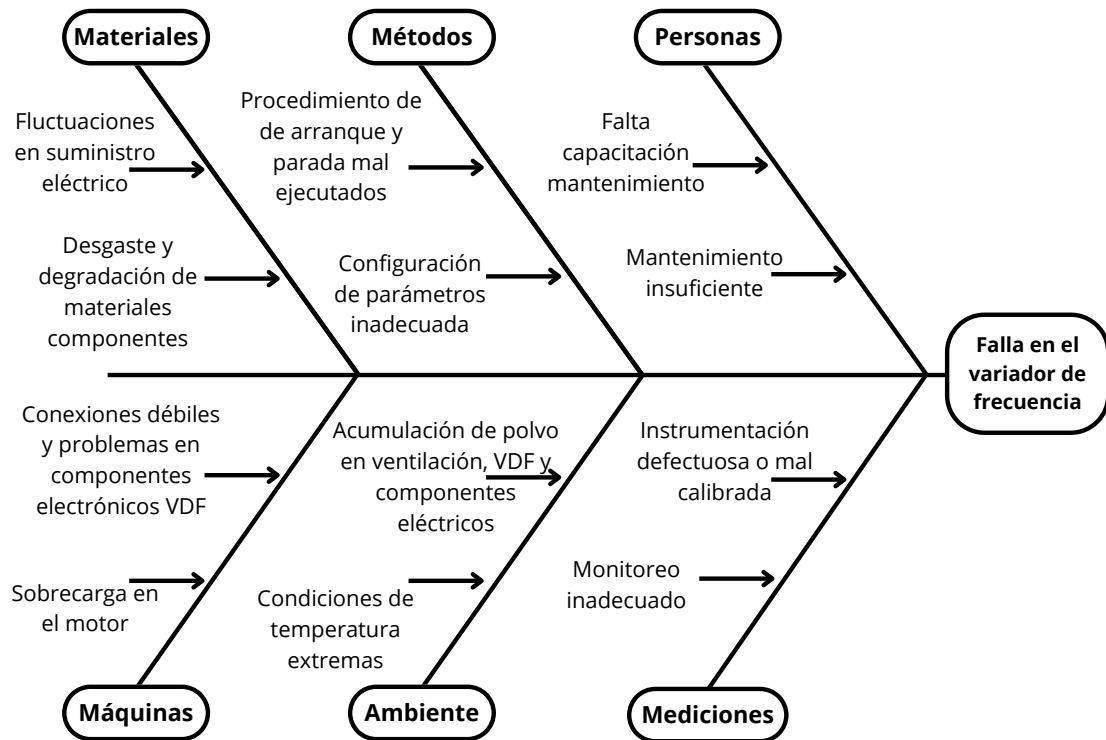


Figura 4.39: Diagrama causa efecto para falla en el variador de frecuencia. Elaboración propia.

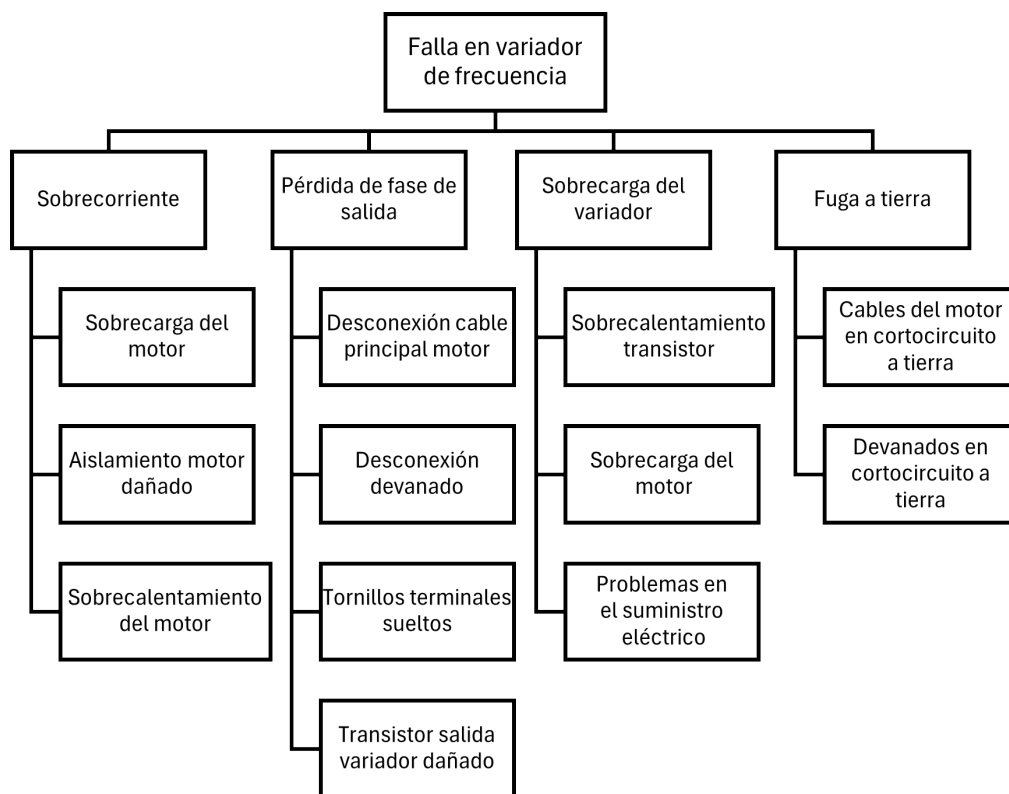


Figura 4.40: Árbol lógico de falla para falla en el variador de frecuencia. Elaboración propia.

De ambos diagramas 4.39 y 4.40, se puede deducir que la falla principal radica en la sobrecarga del motor principal y el sobrecalentamiento del transistor del variador de frecuencia.

Problema	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?	¿Por qué?
Sobrecarga en el motor principal	Desequilibrio o sobrecarga de alimentación	Desregulación del sistema de alimentación	Sensores o controles defectuosos o mal calibrados	Procedimiento de mantenimiento inadecuado	Falta regularidad, capacitación o procedimiento establecido
Sobrecalentamiento del transistor	Falla en el sistema de refrigeración	Falla u obstrucción de ventiladores	Falta de mantenimiento regular	Procedimiento de mantenimiento inadecuado	Falta regularidad, capacitación o procedimiento establecido

Figura 4.41: Diagrama de los cinco porqués para falla en el variador de frecuencia. Elaboración propia.

4.4.3. Hallazgos

El análisis realizado revela una tendencia hacia ciertos patrones y tipos de causas específicas. En particular, se destaca la desregulación del sistema de alimentación, las fallas de los componentes del sistema de lubricación de los rodamientos principales (bomba, líneas y sellos), el desajuste de los pernos de los revestimientos y la falla u obstrucción de la ventilación del motor principal como las principales causas de los modos de falla estudiados.

Se concluye que estos sistemas y componentes requieren una reestructuración en su mantenimiento, esperando reducir la incidencia de falla y aumentar la eficiencia de molienda. Es necesario revisar detalladamente los procedimientos existentes, ajustar las frecuencias de aplicación y mejorar las prácticas de mantenimiento, capacitando adecuadamente al personal y mejorando los registros de los eventos de falla. Tras los análisis de fallas, este último punto se detecta con grandes falencias, mostrando registros de fallas con información precaria e incluso errónea. Es por ello que se propone que estos deben cumplir con aspectos mínimos para permitir una comprensión completa de las fallas en el futuro, incluyendo:

- Identificación clara del equipo afectado (nombre y código) y componente específico de falla.
- Descripción y registro detallado de las reparaciones realizadas en respuesta a la falla.
- Documentación y descripción de las pruebas y observaciones hechas durante las inspecciones.
- Enumeración y descripción de las causas potenciales y reales (tras el análisis) de las fallas.

4.5. Plan de mejoramiento

En la presente sección se exhiben las soluciones propuestas frente a las fallas críticas detectadas, mostrando los tipos de estrategias convenientes a utilizar, el cómo desarrollarlas, implementarlas y dar seguimiento a cada una de ellas.

4.5.1. Estrategias de mantenimiento

Con la información de las causas raíces de los modos de fallas estudiados, se debe decidir qué estrategia o estrategias de mantenimiento se aplican para reducir los riesgos a un nivel tolerable. Para ello, se emplea la hoja de decisión del RCM, que sigue una lógica y orden para la toma de decisiones, consistente en una lista ordenada de preguntas que se pueden responder de forma afirmativa o negativa. Dicho diagrama se puede revisar en detalle en la figura 6.41 adjuntado en el Anexo F.

Las respuestas de las preguntas se van registrando en la hoja de decisión que se exhibe en la imagen 4.42 considerando los seis modos de falla. Estas se anotan en función del equipo escogido, donde la sección M responde al molino, usando B para el molino de bolas y S para el molino SAG. Luego, se identifica la función que se deja de cumplir (F), el estado de falla afectado (FS) y el modo de falla correspondiente (FM).

Posteriormente, se evalúa la categoría de riesgo, respondiendo la primera pregunta del árbol de decisión: ¿El modo de falla se hará evidente para el observador en condiciones normales de operación?, escribiendo una S si la respuesta es afirmativa y una N si es negativa. Cabe mencionar que una falla se clasifica como *evidente* si se detecta fácilmente y de forma inmediata por los operadores o sistemas de monitoreo, sin necesidad de inspecciones o revisiones profundas. En caso contrario, la falla es oculta y puede permanecer sin ser descubierta por un período amplio de tiempo. Seguidamente, en ES y HS se identifica si la falla presenta consecuencias para la salud y seguridad de las personas, en EE y HE si tiene consecuencias ambientales y en EO frente a consecuencias operacionales evidentes. Si la falla es oculta y tiene consecuencias operacionales, se considera en las preguntas que siguen. Todos los modos de falla identificados desatan consecuencias en estos tres ámbitos, no obstante, a raíz de la naturaleza del árbol de decisión que prioriza la salud y seguridad, seguido por el medio ambiente y por último las operaciones, solo se debe inspeccionar el impacto en uno de estos tres ámbitos, que por lógica, debiese ser el primero y detenerse, pero con el fin de resolver la falla de forma óptima, se decide en qué se registra el aspecto con mayor impacto, dictado por el nivel de riesgo chequeado en el análisis del FMECA. En la misma línea, si se apuntan consecuencias en salud y seguridad con el nivel 4 en adelante (casos de muerte), se fija de inmediato en este ítem.

Para las preguntas sobre la evaluación de la estrategia de gestión de riesgos a aplicar, se utiliza el mismo sistema de S o N. Las preguntas relacionadas a tareas de la condición

del monitoreo equivalen a las categorías HP1, HO1, EP1, EO1 y ET1 en la tabla 4.42. Las relacionadas a las tareas de restauración programadas para el componente afectado corresponden a los ítems HP2, HO2, EP2, EO2 y ET2. Por otro lado, HP3, HO3, EP3, EO3 y ET3 cuestionan si es viable una tarea de descarte del componente. HP4 Y HO4 se refieren a las tareas de búsquedas de fallas. HP5 Y EP4 hacen referencia a la combinación de cualquiera de las tareas de mantenimiento anteriores. Por último, EP5 Y EO4 evalúan si se requiere optimizar los dispositivos de protección. Una vez respondidas todas las preguntas, se describe la estrategia de mantenimiento seleccionada, que considera tanto el modo de falla como sus causas raíces.

Referencia				Evaluación de la categoría de riesgo				Evaluación de la estrategia de gestión de riesgos										Descripción de la estrategia de gestión de riesgos
M	F	FS	FM	1	ES HS	EE HE	EO	HP1 HO1 EP1 EO1 ET1	HP2 HO2 EP2 EO2 ET2	HP3 HO3 EP3 EO3 ET3	HP4	HP5	HO4	EP4	EP5	EO4		
B	B	1	A	N	N	N	N	S									Mantenimiento predictivo con monitoreo periódico del alineamiento del cabezal. Monitoreo de la condición con nuevos sensores para evitar la desregulación de la alimentación del molino.	
B	E	1	A	N	N	N	N	S									Mantenimiento predictivo con monitoreo del desgaste de los revestimientos. Tarea preventiva para la soltura de pernos. Monitoreo de la condición con nuevos sensores para evitar la desregulación de la alimentación del molino.	
B	K	2	B	S	S			N	N	N					S		Monitoreo de condición y mantenimiento preventivo al sistema de lubricación.	
S	B	1	C	N	S			N	N	N					S		Monitoreo de condición, mantenimiento predictivo y preventivo al sistema de lubricación. Monitoreo de la condición con nuevos sensores para evitar la desregulación de la alimentación del molino.	
S	D	1/2	A	N	S			N	N	N		S					Tarea preventiva para la soltura de pernos. Monitoreo de la condición con nuevos sensores para evitar la desregulación de la alimentación del molino.	
S	F	1	C	S	S			N	N	N					S		Monitoreo de temperatura del variador de frecuencias. Mantenimiento preventivo para sistema de ventilación. Monitoreo de la condición con nuevos sensores para evitar la desregulación de la alimentación del molino.	

Figura 4.42: Hoja de decisión para el mantenimiento de modos de fallas críticas. Elaboración propia.

4.5.2. Desarrollo de las estrategias

A continuación, se presentan las estrategias de mantenimiento seleccionadas en detalle. Primordialmente se busca atacar las causas raíces de los modos de falla críticos de los molinos, que, como se indicó en los hallazgos del análisis de raíz, son causantes de la mayoría de dichas fallas. Además, se discute en términos generales las medidas escogidas para el sistema de alimentación y de lubricación de los rodamientos principales de ambos molinos.

Asimismo, se realiza una revisión de los planes de mantenimiento actuales de la planta para complementar o alterar acciones dentro del mismo y analizar cómo se están abordando las fallas mencionadas.

4.5.2.1. Alineamiento del cabezal

Comenzando con el desalineamiento del cabezal con el muñón y la carcasa, se decide implementar tareas predictivas para el desalineamiento. Para esto se requiere, en primer lugar, realizar mediciones periódicas de esta condición. En el contexto actual, dicha tarea se monitorea anualmente y la recurrencia de falla de este tipo es de una vez cada 5 años según los eventos registrados, por lo que el mantenimiento se conserva. Cabe destacar que el modo de medición es topográfico por lo que se puede mejorar y migrar hacia la tecnología de medición láser, como la del *Láser Tracker*, que posee una alta precisión en la medición, del orden de micrómetros, también permite realizar mediciones más rápidas y con mayor facilidad entregando datos de posiciones tridimensionales, distancias y ángulos, pudiendo exportar los datos en distintos formatos [42]. Se propone incluir este dispositivo para la medición del alineamiento estructural del molino y desarrollar un análisis del comportamiento con los datos para prevenir la falla y las consecuencias graves que conlleva, sobre todo el amplio tiempo de detención y los costos de la intervención. Además, se puede emplear Machine Learning para el entrenamiento de un algoritmo que pueda detectar desviaciones del funcionamiento normal y predecir la falla, realizando una base de información con datos anuales de alineamiento y cruzarlo con las mediciones termográficas y de vibraciones que se aplica en los planes de mantenimiento actuales, para trabajar a largo plazo, o también se puede aumentar la recurrencia de las mediciones y obtener una rauda respuesta. La decisión de la medida a escoger es responsabilidad de la empresa.

Por otro lado, si bien la soldadura de los pernos en las uniones del cabezal no se contempló como la causa raíz más probable de ocurrir, se detecta en los planes de mantenimiento de la planta una pequeña deficiencia en las medidas preventivas en este ámbito, por lo que se acoge como tarea a medrar. Es necesario recalcar que la tarea de inspección de pernos se realiza en todos los planes de mantenimiento de la planta (semanal, mensual, semestral, trimestral y anual). Este explícitamente indica:

Controlar visualmente el estado de pernos de la carcasa del molino. Si se ven fugas debe

reapretar los pernos de revestimiento. Si existen fugas grandes en las zonas de las Tapas se debe reapretar inmediatamente los pernos. Las fugas de pulpa por las tapas dañan los rodamientos de Trunnions.

No obstante, la inspección es visual, por lo que depende del criterio del operador evaluar la existencia de fugas. En caso de que no se expongan, puede pasar tiempo antes de que se realice, por lo que se puede agregar más información a dicha tarea. En concreto, no se resuelve el caso en que tras el apriete de pernos las fugas continúen. Por ello, se propone incluir la frase al final del texto: *Si la filtración no se resuelve al apretar el perno, recambie los sellos. Si no se ha realizado la tarea de reapriete de pernos en un año o cada 100 horas de funcionamiento del molino, debe reapretarlos durante la inspección.* Esto se fundamenta con lo indicado por el proveedor del equipo en el manual del molino de bolas [30].

4.5.2.2. Revestimientos de levante

Los planes de mantenimiento no consideran la medición, inspección o cambio programado de los revestimientos del molino de bolas. Por esto, sus fallas de desgaste o fractura se abordan con medidas predictivas, para poder predecir y planificar el cambio de revestimientos oportunamente. Una de las tecnologías más avanzadas en este ámbito es el Millmapper desarrollado por Metso, entregando el servicio de monitoreo, que consiste en la aplicación de escáneres láser para la toma de mediciones en el interior de la totalidad del molino sin necesidad de ingresar, para luego modelar en tres dimensiones el estado de los revestimientos, entregando las medidas del espesor, indicando patrones, anomalías, curvas de desgaste y un pronóstico para el cambio de los componentes [43]. Dada la recurrencia de la necesidad de cambio de revestimientos, se propone incorporar esta actividad semestralmente. En la figura 4.43 se muestra un ejemplo del modelamiento 3D y las curvas de desgaste que se desarrolla para los revestimientos.

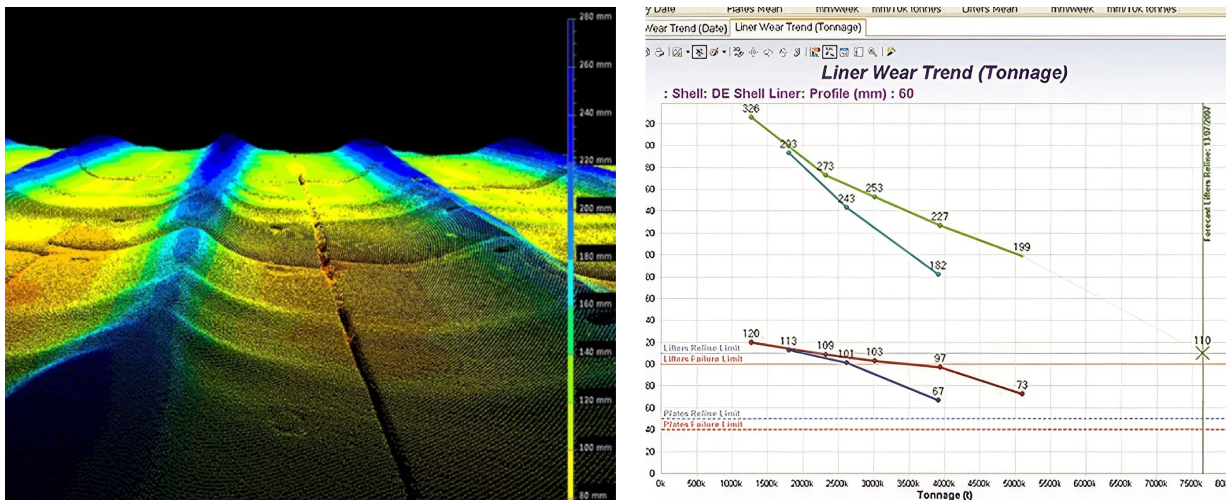


Figura 4.43: Ejemplo de resultados del Millmapper. [43].

Una de las causas raíces para esta falla es la soltura de los pernos de sujeción de los revestimientos, que al igual que para el cabezal, en el plan actual se le aplica la misma actividad de mantenimiento. De acuerdo al manual del molino, el reapriete debe ser en la misma frecuencia, cada 100 horas de funcionamiento o anualmente, y la probabilidad de falla de los pernos es una vez cada 5 años, por lo que se mantiene la tarea propuesta de mejora de la actividad a realizar en la mantención descrita anteriormente para el cabezal.

4.5.2.3. Variador de frecuencia del motor principal

Una de las principales causas de falla en el variador de frecuencia es el sobrecalentamiento por la ventilación insuficiente. Estos equipos cuentan con ventiladores integrados y disipadores de calor, que por las condiciones hostiles de molienda, se obstruyen regularmente. Como medida de mantenimiento se incorpora el monitoreo continuo de la temperatura del variador, incorporando un sensor tipo PT100 que posee alta precisión, estabilidad a largo plazo y está encapsulados para resistir humedad, polvo y corrosión. Una buena opción que cumple estas características sería un sensor del modelo HEL-700 de Honeywell [44].

Adicionalmente, como medida preventiva, se deben incluir acciones para limpiar y revisar los componentes del sistema de enfriamiento del variador al plan de mantenimiento. Por tanto, se proponen las siguientes actividades sujetas a verificación y modificación por un experto, con una frecuencia mensual:

- Inspeccione visualmente el variador y el área circundante para detectar signos de acumulación de partículas. Limpie con un paño de ser necesario.
- Revisar que los ventiladores, disipadores y rejillas de ventilación no estén obstruidos.
- Limpiar ventiladores, disipadores y rejillas con aire comprimido a baja presión.
- Revisar conexiones eléctricas del sistema de enfriamiento, que estén firmes y sin signos de desgaste o daño. Apretar o reemplazar conexiones según sea pertinente.

4.5.2.4. Sistema de alimentación

Para dar solución a la causa de desregulación de la alimentación, se decide implementar tareas de monitoreo de la condición, pero es necesario presentar las condiciones actuales del sistema de monitoreo de carga de los molinos para visualizar el panorama completo.

Revisando este sistema, por un lado, el molino SAG recibe la carga desde una correa transportadora que alimenta el chute que descarga en el molino. Esta correa esta equipada con un pesómetro que mide el peso de la carga que ingresa al molino, monitoreando la cantidad de material permitiendo controlar el flujo de ingreso e incluso el tamaño del mineral. También, tanto el molino SAG como el molino de bolas cuentan con celdas de carga que miden la carga total del molino, detectando sobrecargas o cargas inferiores que pueden dañar los componentes del equipo. Bajo este escenario, se detectaron múltiples eventos de fallas

relacionados directamente a las celdas de carga y a la carga dentro del molino, lo que indica una falta de mantenimiento preventivo de las celdas.

Por otra parte, dadas las nuevas tecnologías emergentes, existen herramientas complementarias o superiores para el monitoreo de la carga en tiempo real. Dentro de estas, surgen sistemas basados en inteligencia artificial para medir la distribución del tamaño del material en bandas transportadoras, reemplazando la labor del pesómetro. Este, utiliza tecnología de imágenes láser 3D para medir el tamaño de las partículas en movimiento en la cinta transportadora, proporcionando una medición constante, estimando el caudal volumétrico acumulativo y brindando estabilidad en la alimentación del molino, lo que aumenta su eficiencia y rendimiento. A modo de ejemplo, el funcionamiento de este sistema se muestra en la imagen 4.44. Una de las opciones de empresas desarrolladoras de este software es Outotec, con el sistema RockSense [45].

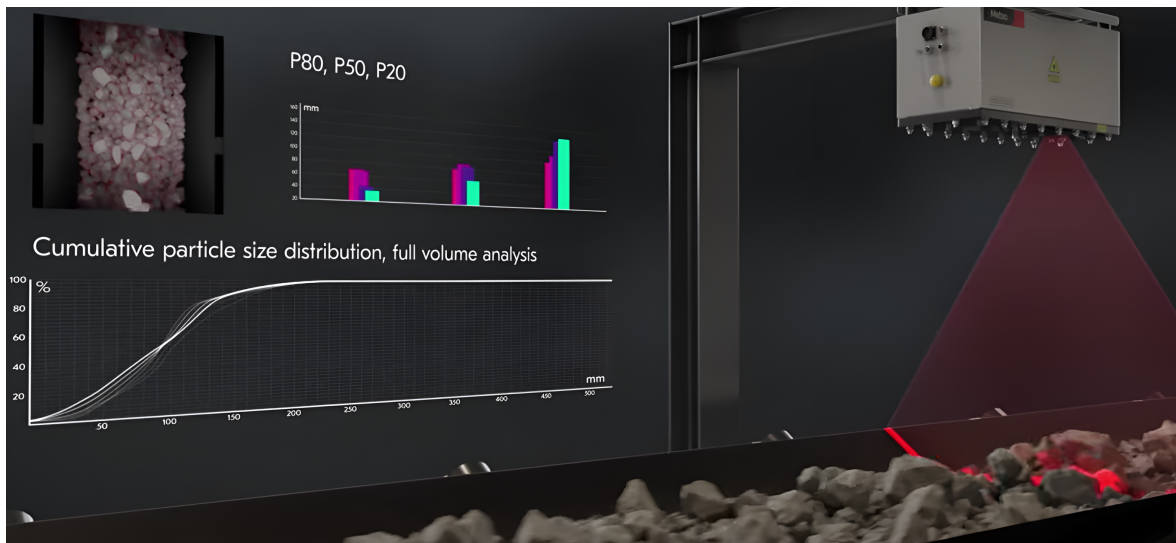


Figura 4.44: Ejemplo de resultados y monitoreo 3D del Rocksense. [45].

Otro punto fuerte a mejorar del sistema de alimentación es el volumen de carga del molino, que gracias a tecnologías como MillSense, se pueden disminuir los problemas causados por los cambios en el mineral mejorando la resistencia ante cambios de dureza, incrementar la protección de revestimientos y aumentar el rendimiento del molino. Esta herramienta que no necesita calibración según el proveedor Metso, analiza la posición y carga volumétrica midiendo los ángulos de la punta y hombro de la carga, a través de un medidor de tensión y sensores de aceleración conectados a un perno de revestimiento de la carcasa del molino, que de forma inalámbrica transfiere los datos al sistema de control del proceso. En la imagen 4.45 se puede observar un ejemplo de los resultados del análisis de posición que entrega. La unidad de sensor se carga de manera inductiva, por lo que no se necesita detención para cambios de baterías al dispositivo [46].

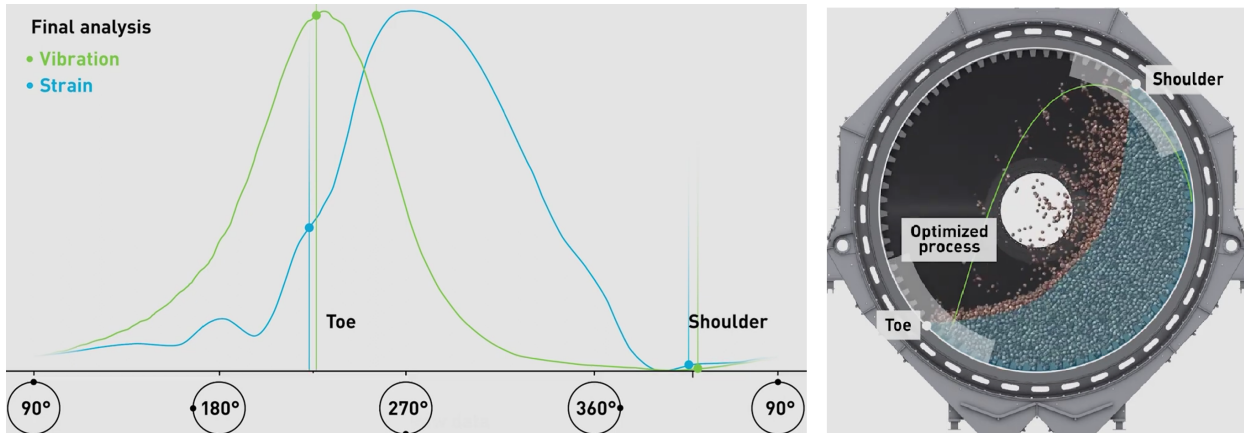


Figura 4.45: Ejemplo del análisis de posición y carga que entrega el Mill-sense. [46].

La información en tiempo real obtenida de ambos dispositivos sobre las condiciones de carga se debe integrar con el control del proceso. Esto permite responder rápidamente a los cambios en las condiciones óptimas de funcionamiento de los equipos, logrando mantener la estabilidad del flujo. Esta estabilidad no solo prolonga la vida útil de los componentes del molino, sino que también mejora la calidad y eficiencia de la producción.

4.5.2.5. Sistema de lubricación de rodamientos principales

El sistema de lubricación puede fallar de diversas formas. Las fallas más probables se producen en el bombeo del lubricante y en los conductos del sistema por fugas, lo que resulta en un nivel bajo de lubricante y, en consecuencia, en la posible contaminación del mismo. Las causas más comunes radican en problemas de presión y contaminación. La insuficiente presión del sistema puede deberse a bombas defectuosas, filtros obstruidos o válvulas reguladoras de presión mal calibradas. Por otro lado, la contaminación del lubricante puede ocurrir por la entrada de partículas externas, agua o productos de desgaste interno del sistema.

En los planes de mantenimiento establecidos, no se menciona la toma de muestra del lubricante para el análisis de los contaminantes, que corresponde a un tema relevante de riesgo de falla para los rodamientos. Esta actividad en los manuales de los equipos ([30] y [29]) se sugiere cada tres meses en un inicio y cada seis meses de acuerdo a los resultados del análisis. Por esto, para comenzar, se opta por la incorporación de la tarea en el plan trimestral. Se añade el ítem: *Tomar muestra de grasa del sistema de lubricación de los rodamientos principales*. El análisis debe comprobar el tipo, contenido, tamaño y distribución de partículas.

También, se propone incorporar el monitoreo de la presión mediante la instalación de sensores de presión en línea en los conductos de suministro de aire tanto al gabinete principal como a las toberas de inyección. Estos sensores pueden proporcionar lecturas continuas de la presión en tiempo real y transmitir los datos a un sistema de monitoreo centralizado SCADA que utiliza la planta.

4.5.2.6. Sistema de control

Para acompañar la evolución tecnológica de los sistemas de control PLC y explotar los nuevos dispositivos incorporados, se propone una integración con IoT Industrial (Internet de las cosas). Dicha integración no solo permitirá una supervisión y control avanzados del sistema en tiempo real, sino que también facilitará la recopilación y organización de datos para desarrollar análisis predictivos utilizando inteligencia artificial y así optimizar el rendimiento del mantenimiento [47]. Como se ilustra en la figura 4.46, incorporando un dispositivo gateway se tiene acceso a la comunicación inalámbrica, conexión a Internet, acceso a aplicaciones basadas en la nube, almacenamiento, entre otros beneficios.

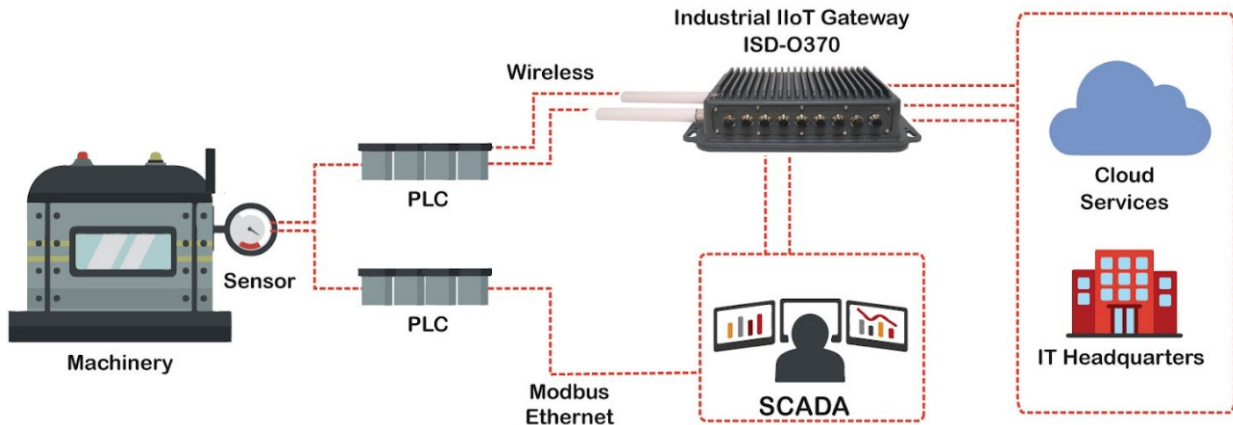


Figura 4.46: Integración del PLC con IoT. [48].

4.5.3. Seguimiento

En primer lugar, se deben organizar capacitaciones para el uso de las herramientas y dispositivos propuestos, gestionándolas directamente con los proveedores de los productos. Esto garantizará que el personal esté familiarizado con las características y funcionalidades de los equipos tecnológicos implementados. Adicionalmente, es esencial gestionar la formación y el entrenamiento del personal de mantenimiento para que puedan realizar de manera efectiva las actividades de mantenimiento, inspecciones y análisis requeridos. Este entrenamiento debe incluir:

- Capacitación técnica: Instrucción detallada sobre el uso de nuevas herramientas, dispositivos y software de monitoreo.
- Procedimientos: Formación en técnicas de inspección, monitoreo de condiciones y análisis de datos para anticipar fallas.
- Protocolos de seguridad: Entrenamiento en prácticas de seguridad para garantizar que todas las actividades se realicen de manera segura y conforme a las normativas.
- Documentación y reporte: Instrucción sobre cómo documentar adecuadamente las actividades de mantenimiento, inspecciones y hallazgos en el software de gestión SAP.

- Actualización continua: Planificación de sesiones de periódicas para mantener al personal informado sobre las últimas tecnologías y prácticas en mantenimiento industrial.

En general, el monitoreo continuo aplicado al modo de falla puede ayudar tanto a mejorar la confiabilidad del equipo, como para monitorear posteriormente la efectividad del plan de mejoramiento y ver que realmente disminuye el desarrollo y ocurrencia de este tipo de falla. Con el mismo propósito, los especialistas en confiabilidad de la planta deben mantener actualizados los indicadores RAM y KPIs de medición mencionados en el BSC (sección 4.1.3), y relacionar los resultados con las estrategias de mantenimiento implementadas, determinando si estas tuvieron un efecto real sobre la confiabilidad de los equipos, sistemas y planta. Asimismo, se debe supervisar el cumplimiento de la actualización del registro de los eventos, cerciorándose efectivamente que se mejora la descripción de los eventos de fallas cumpliendo con la información mínima propuesta a registrar.

Para ayudar a verificar lo planteado, se recomienda llevar a cabo auditorías regulares utilizando modelos de gestión del mantenimiento como AMORMS (*Asset Management, Operational Reliability & Maintenance Survey*) y sistemas CMMS (Computerized Maintenance Management System). AMORMS proporciona una evaluación integral mediante cuestionarios con puntuaciones que permiten determinar el estado de la gestión de activos y la fiabilidad operativa, mientras que el CMMS facilita la supervisión y análisis de las actividades de mantenimiento a través de herramientas informáticas [24].

Durante las auditorías, se revisa la información verificando que se mantengan los registros precisos y completos de las actividades de mantenimiento (SAP), se revisan los equipos e instalaciones asegurando la correcta realización de las tareas de mantenimiento. Finalmente, es fundamental realizar entrevistas con técnicos y operarios para obtener retroalimentación directa sobre el proceso de mantenimiento, identificar posibles áreas de mejora y ajustar las prácticas y procedimientos para optimizar la eficiencia y efectividad del programa de mantenimiento.

4.6. Proyección de Confiabilidad

Para efectos del presente trabajo, no es posible poner en marcha el plan directamente en planta y luego verificar su efectividad, por lo que se debe simular la proyección de los indicadores de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad bajo cierto escenario.

Se espera que las estrategias de mantenimiento propuestas, derivadas del exhaustivo análisis de fallas en la planta de flotación, contribuyan al aumento de los tiempos entre fallas (TTF) y a la reducción de los tiempos de reparación (TTR) en las fallas críticas. Para facilitar la simulación, se asume una variación del 20% en estos tiempos. A partir de esta premisa, se procede a estimar los parámetros correspondientes.

Para ello, se identificaron todos los eventos de fallas registrados en la base de datos de la planta que tuvieran relación con los modos de fallas críticas o sus causas raíces y se aplicó la variación porcentual exclusivamente a estas. Luego se estimaron los indicadores y se obtuvieron las curvas de confiabilidad y mantenibilidad para cada equipo por separado.

Con respecto a la confiabilidad del molino de bolas, mostrada en el gráfico de la figura 4.47, se aprecia un incremento de la curva, especialmente en el intervalo de 500 a 2000 horas de operación. Este incremento sugiere una mejora en la confiabilidad del equipo tras la implementación del plan de mantenimiento.

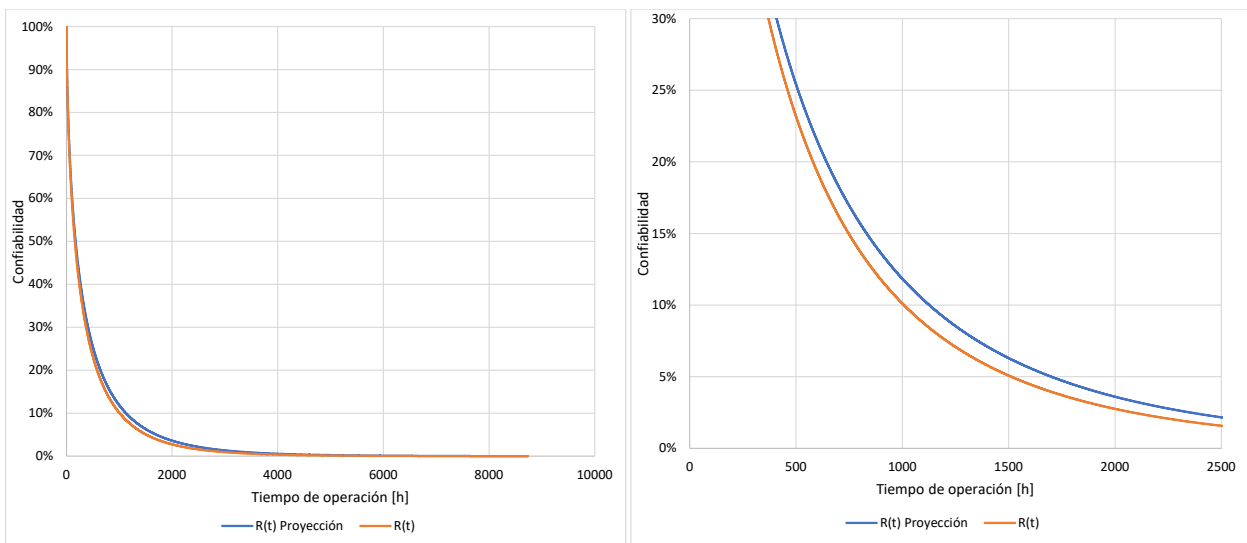


Figura 4.47: Curvas de confiabilidad del molino de bolas previo y posterior al plan. Gráfico de acercamiento a la derecha. Elaboración propia.

Al analizar en mayor detalle las confiabilidades de los modos de falla críticos del molino de bolas, graficados en la figura 4.48, se observa que el mayor aumento se presenta en los revestimientos, con un crecimiento de aproximadamente el doble en comparación con los cabezales y el sistema de lubricación de los rodamientos. Específicamente, los revestimien-

tos muestran un incremento de hasta un 10%, mientras que los cabezales y el sistema de lubricación aumentan entre un 3% y un 4%.

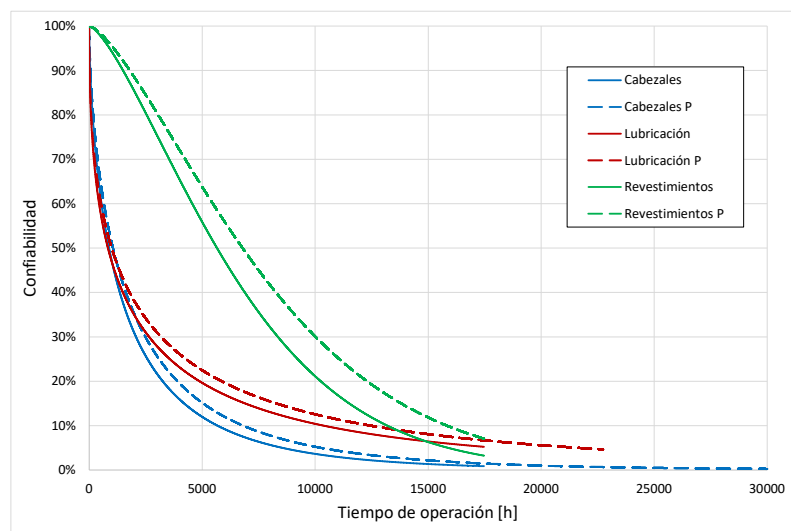


Figura 4.48: Curvas de confiabilidad de los modos de falla críticos del molino de bolas previo y posterior al plan. Elaboración propia.

En relación con la confiabilidad del molino SAG, mostrada en la figura 4.49, también se observa un aumento, aunque en menor medida que en el molino de bolas. Esto sugiere que, si bien se han realizado mejoras, aún hay margen para optimizar la confiabilidad del molino SAG.

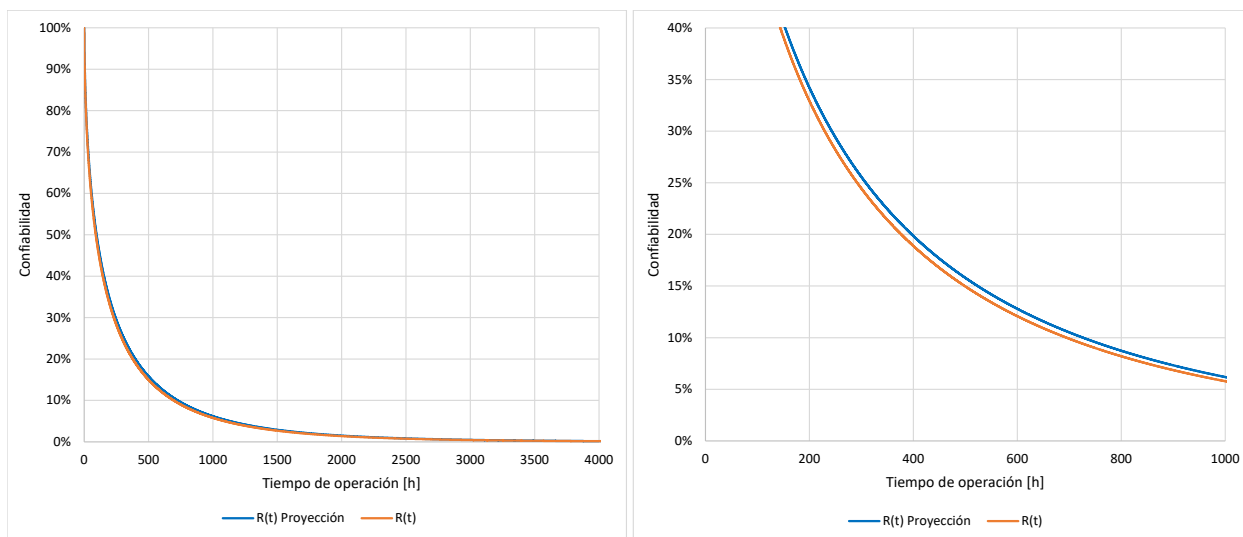


Figura 4.49: Curvas de confiabilidad del molino SAG previo y posterior al plan. Gráfico de acercamiento a la derecha. Elaboración propia.

Las confiabilidades de los modos críticos de falla del molino SAG, presentadas en la figura 4.50, muestran un incremento semejante en los tres componentes: cabezales, respaldo y variador de frecuencia, con un aumento aproximado del 2%.

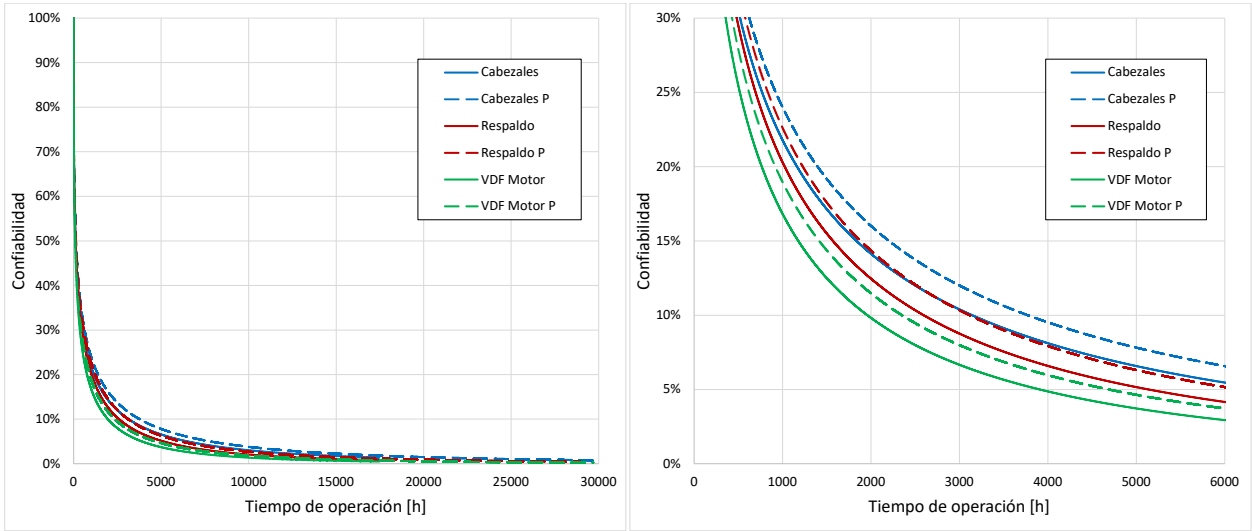


Figura 4.50: Curvas de confiabilidad de los modos de falla críticos del molino SAG previo y posterior al plan. Gráfico de acercamiento a la derecha. Elaboración propia.

Por otro lado, en la gráfica de mantenibilidad del molino de bolas (figura 4.51), se observa un incremento muy pequeño, inferior al 1%.

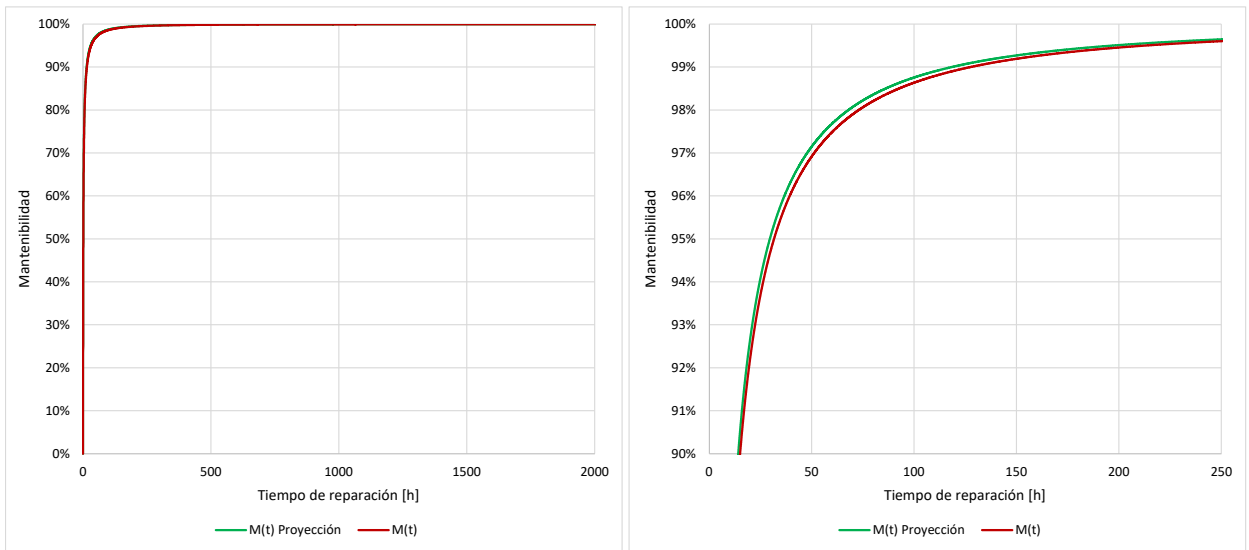


Figura 4.51: Curvas de mantenibilidad del molino de bolas previo y posterior al plan. Gráfico de acercamiento a la derecha. Elaboración propia.

Las mantenibilidades en los componentes de los modos de falla críticos del molino de bolas (figura 4.52) muestran resultados similares de aumento, con un incremento de aproximadamente un 1,5% en los revestimientos y el sistema de lubricación, y un crecimiento levemente mayor de aproximadamente un 2% en los cabezales, los cuales tienen menor mantenibilidad en comparación con los otros componentes.

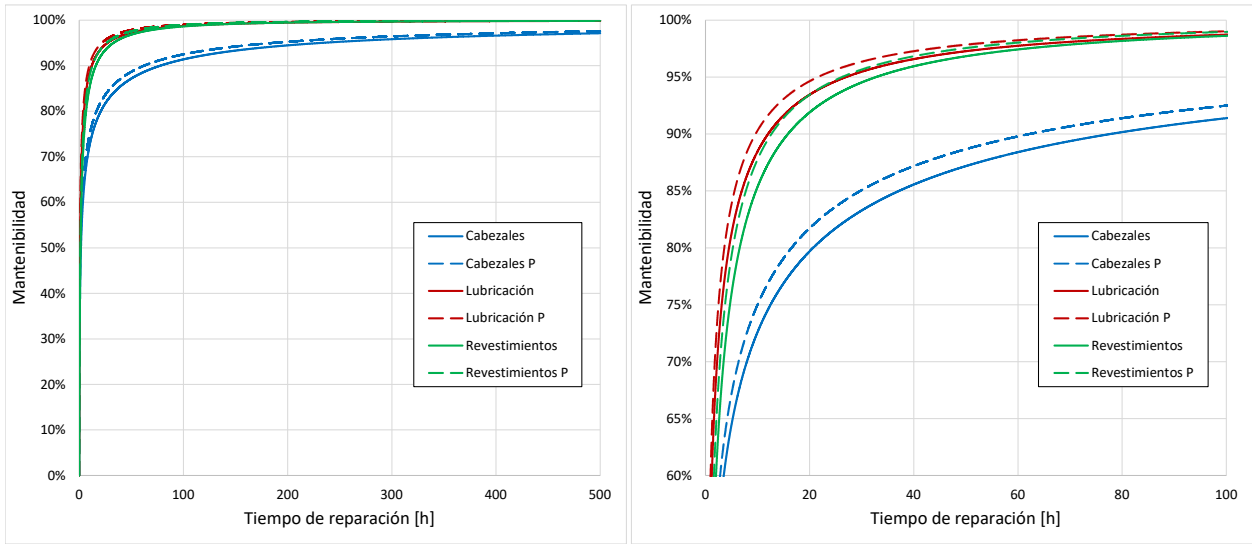


Figura 4.52: Curvas de mantenibilidad de los modos de falla críticos del molino de bolas previo y posterior al plan. Gráfico de acercamiento a la derecha. Elaboración propia.

En el caso del molino SAG, la mantenibilidad mostrada en el gráfico 4.53 también incrementó menos del 1%, aunque en menor medida que en el molino de bolas.

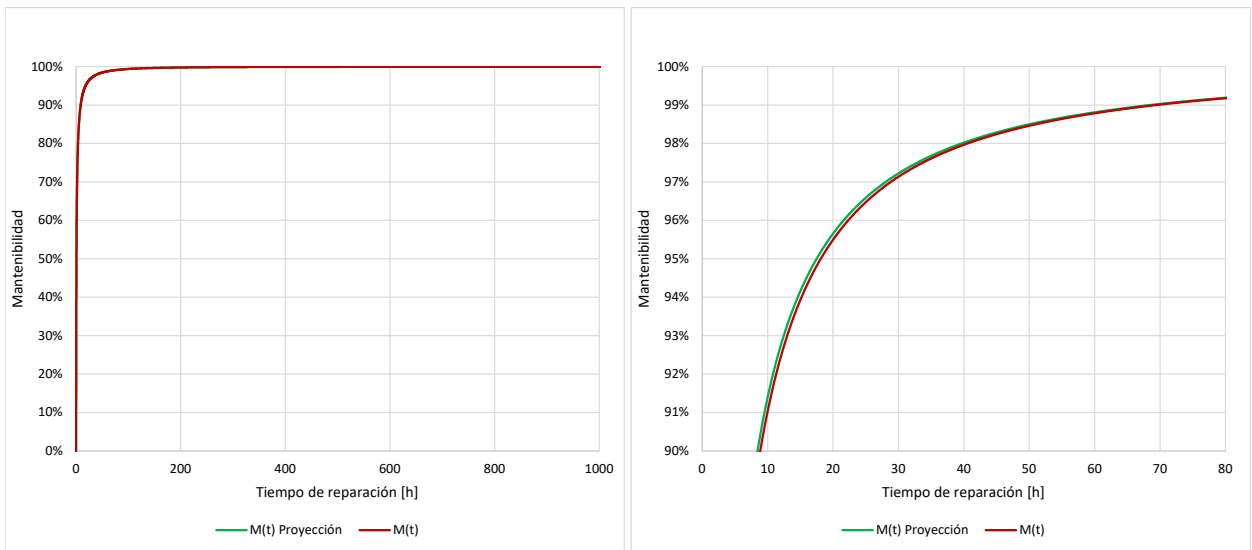


Figura 4.53: Curvas de mantenibilidad del molino SAG previo y posterior al plan. Gráfico de acercamiento a la derecha. Elaboración propia.

La mantenibilidad en los modos críticos del molino SAG (figura 4.54) presenta un comportamiento similar al del molino de bolas. Ambas máquinas muestran dos curvas parecidas y una por debajo, aunque en el caso del molino SAG, estas se encuentran en un rango más alto de mantenibilidad. El incremento observado en mantenibilidad es similar, oscilando entre el 1% y el 2%. Sin embargo, la mantenibilidad del respaldo es inferior en comparación con los otros dos componentes.

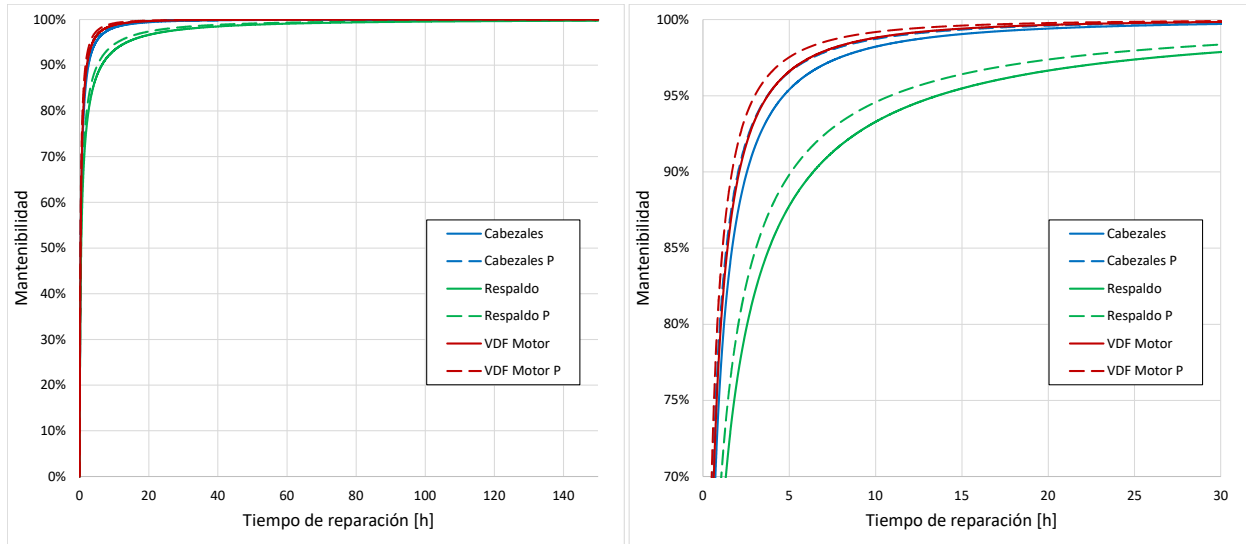


Figura 4.54: Curvas de mantenibilidad de los modos de falla críticos del molino SAG previo y posterior al plan. Gráfico de acercamiento a la derecha. Elaboración propia.

En la siguiente tabla 4.23, se presentan los resultados obtenidos de los valores de los indicadores RAM antes y después de la aplicación del plan, con la estimación de la proyección en el mismo instante de tiempo.

Tabla 4.23: Comparación resultados antes y después de aplicar el plan según simulación. Elaboración propia.

	Molino SAG			Molino de bolas		
	Antes	Después	%	Antes	Después	%
Confiabilidad	7,47 %	7,97 %	0,5	15,58 %	17,61 %	2,04
Mantenibilidad	91,04 %	91,41 %	0,36	86,05 %	86,70 %	0,65
Disponibilidad	98,35 %	98,53 %	0,18	95,47 %	96,34 %	0,86
MTBF [h]	261,6	274,2	4,8	375,4	393,0	4,7
MTTR [h]	4,4	4,1	6,7	17,8	14,9	16,1
Tasa de falla [1/h]	0,0038	0,0036	4,6	0,0027	0,0025	4,5
Pérdida producción [tms/año]	1268	1182	6,8	3773	3166	16,1
Costo mantención [usd/año]	504540	489339	3,0	411707	383277	6,9

Los resultados indican una mejora general en los indicadores de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad tanto para el molino SAG como para el molino de bolas tras la implementación del plan de mantenimiento. Sin embargo, las mejoras en el molino de bolas son más significativas en comparación con el molino SAG, especialmente en términos de confiabilidad, disponibilidad y tiempo medio de reparación (MTTR). La reducción en los tiempos de reparación para ambos molinos evidencia que las estrategias de mantenimiento

han sido efectivas en mejorar la eficiencia de las reparaciones. Aunque los incrementos en disponibilidad y confiabilidad son modestos, son consistentes y positivos, lo que sugiere que el plan de mantenimiento tiene un impacto favorable en el rendimiento operativo de los equipos.

En el ámbito financiero, las medidas de pérdida de producción y costos de mantenimiento muestran resultados mucho más notables, alcanzando hasta un 16 % de mejora en la pérdida de producción en el molino de bolas debido a las inactividades y una reducción aproximada del 7 % en los costos de mantenimiento. En términos generales, esto se traduce en una reducción del 4,8 % en los costos de mantenimiento y del 13,8 % en la pérdida de producción por inactividad en el sistema de molienda.

Capítulo 5

Análisis de resultados

A pesar de que no se logró un aumento considerable en el grado de optimización de la confiabilidad del proceso, los resultados se consideran positivos, puesto que cada pequeño incremento contribuye en la mejora continua. Además, estos beneficios acumulativos no solo mejoran gradualmente el rendimiento del sistema, sino que también establecen una base sólida para futuros progresos. Esto se debe a que la metodología RCM no solo se enfoca en mejorar las confiabilidades y reducir las frecuencias de fallas, sino también en gestionar los riesgos, priorizando la seguridad de las personas y del medio ambiente por encima de todo. Por esta razón, abordar los modos de falla críticos puede no tener un impacto inmediato y significativo en los indicadores RAM, pero es crucial para garantizar la seguridad y la sostenibilidad a largo plazo del sistema.

La comparación de la mejora porcentual en la mantenibilidad antes y después de aplicar el plan de mantenimiento revela que el molino de bolas ha experimentado una mayor alza en comparación con el molino SAG. Sin embargo, para evaluar completamente la factibilidad y los beneficios del plan de mantenimiento aplicado a cada equipo, es necesario realizar un análisis económico detallado tanto a corto como a largo plazo.

Se observó un incremento mayor en la proyección de la confiabilidad del molino de bolas, atribuible a las mejoras implementadas en el plan de mantenimiento general. No obstante, las fallas relacionadas con el desgaste, deformación o fractura de los revestimientos de levante tienen un gran impacto, ya que las causas raíces, como la desregulación del sistema de alimentación y la soltura de pernos, influyen más en el aumento y recurrencia de esta falla en comparación con otros componentes, además de tener una alta frecuencia de ocurrencia.

El desalineamiento en el molino de bolas y el cambio de cabezales por desgaste en la unión en el molino SAG presentan mayores tiempos de detención debido a la complejidad de las tareas correctivas. Las acciones preventivas y procedimientos propuestos para estas fallas han demostrado ser particularmente efectivos en términos de mantenibilidad. La introducción de un dispositivo de medición rápida y precisa ha reducido el tiempo necesario para detectar

desalineamientos, otorgando una mayor flexibilidad para la reparación misma. Asimismo, se ha propuesto la integración del análisis de datos con inteligencia artificial, lo cual se espera que, a largo plazo, minimice la aparición de estas fallas en el molino.

Del mismo modo, los costos de reparación de los cabezales y revestimientos se ven altamente favorecidos, lo que, a largo plazo, también beneficiará la calidad del producto, gracias a las estrategias de monitoreo de condición y mantenimiento predictivo. A nivel global, se logra una notable disminución en la pérdida de producción, resultando en un incremento significativo en los ingresos. En cuanto a las metas establecidas en el Balanced Scorecard, los resultados están en consonancia con los objetivos propuestos. La reducción de costos se aproxima al 5 % estimado, mientras que la reducción de pérdidas lo supera.

Por otra parte, el análisis de simulación de los indicadores se realizó bajo el supuesto de variar un 20 % los tiempos de operación y reparación. Se estimó que una reducción en los tiempos de operación (TTF) podría incrementar la confiabilidad hasta en un 1,4 % para el molino SAG y un 2,27 % para el molino de bolas. Sin embargo, no se obtuvieron resultados significativos, lo que puede explicarse por un enfoque no óptimo. Un enfoque más adecuado sería evaluar directamente la resolución y recurrencia de las fallas. En lugar de simplemente reducir los tiempos, se podrían minimizar los eventos registrados, sugiriendo que tales fallas no ocurren debido a que el plan propuesto mitiga o elimina su frecuencia. Este ajuste mejoraría la precisión de la simulación. Finalmente, la efectividad del plan de mantenimiento se determina por la correcta implementación de las actividades en la planta y su seguimiento continuo.

Capítulo 6

Conclusiones

El presente estudio permitió comprender la relevancia que tiene la implementación de metodologías estructuradas como RCM para entender la viabilidad técnica y operativa que conlleva la optimización de los sistemas y procesos de mantenimientos. Esta comprensión ha sido fundamental para mejorar la eficacia del proceso de la planta de flotación de escoria de Codelco.

A través del análisis detallado y la implementación de las metodologías propuestas, se ha logrado abordar de manera integral cada uno de los objetivos planteados al inicio del estudio.

De acuerdo con el análisis de criticidad realizado mediante la metodología RCM, se concluye que los equipos más críticos son el molino de bolas y el molino SAG, pertenecientes al sistema de molienda. El análisis FMECA revela que los principales modos de falla están relacionados con una lubricación inadecuada, desgaste o desalineamiento de los componentes. Lo que conlleva al análisis causa raíz, donde se determina que las principales causas que generan las fallas en los equipos están asociadas a la naturaleza del proceso de molienda, incluyendo vibraciones excesivas, condiciones no óptimas del proceso, contaminación y desviaciones en los parámetros del proceso.

En cuanto al plan de mejoramiento, la implementación de nuevas tecnologías es esencial para alcanzar el objetivo de optimizar la confiabilidad, conforme a la metodología RCM. Tecnologías como MillMapper son clave para la predicción y planificación del cambio de revestimientos. Asimismo, el uso de Machine Learning facilita la detección de desviaciones y la predicción de fallas a lo largo del tiempo. La herramienta Laser Tracker permite una medición precisa de la alineación en posiciones tridimensionales, mientras que los sensores avanzados, como el modelo HEL-700 de Honeywell, ofrecen monitoreo de la temperatura con alta resistencia a la humedad, polvo y corrosión. Además, la inteligencia artificial se emplea para la cuantificación de la distribución granulométrica del material y la masa sobre las correas transportadoras, optimizando el control de parámetros y mejorando la eficiencia, entre otras aplicaciones.

Se deduce que la implementación de los cambios estudiados en los equipos resulta en un progreso importante en su mantenibilidad y confiabilidad, lo que confirma la efectividad de la metodología RCM. Sin embargo, es importante recordar que el seguimiento continuo también es crucial, ya que determinará la efectividad final del plan.

Respecto a las limitaciones del trabajo, se destaca la relevancia del apoyo de un equipo multidisciplinario en la planta, que incorpore especialistas y trabajadores con experiencia en mantenimiento y operaciones, puesto que se requiere para abordar las distintas ramas del proyecto. Aunque la falta de dicho apoyo, representó un desafío, la experiencia adquirida se convirtió en una valiosa oportunidad de aprendizaje, permitiendo profundizar en conocimientos técnicos y en la aplicación de la metodología RCM, consiguiendo una preparación en la gestión de activos físicos con enfoque en la confiabilidad.

En cuanto a los alcances, si bien el análisis de la confiabilidad mediante la metodología RCM se muestra y desarrolla como un método robusto, se puede ampliar el enfoque integrándolo con el mantenimiento productivo total.

Finalmente, para futuros trabajos se recomienda realizar un análisis económico que permita un estudio más completo y exhaustivo. Incluir esta dimensión facilitará la evaluación no solo de la viabilidad técnica y operativa del proyecto, sino también de su sostenibilidad financiera y su impacto económico tanto a corto como a largo plazo.

Asimismo, para brindar mayor realismo al estudio de confiabilidad, se propone contemplar el uso de factores de riesgo, ya que estos incluyen las probabilidades de fallos y eventos adversos.

En la misma línea, el análisis detallado mediante FMECA ha proporcionado una comprensión profunda de los modos de falla y su criticidad en el sistema de molienda. Para fortalecer aún más la optimización del sistema, se recomienda complementar este análisis con un estudio HAZOP, el cual permitirá identificar y evaluar desviaciones operacionales y riesgos de seguridad que el FMECA podría no haber capturado completamente. Esta perspectiva mejorará en gran medida la confiabilidad y seguridad del sistema de molienda, asegurando un funcionamiento más estable y eficiente. Los pasos propuestos para la implementación de HAZOP incluyen la revisión de resultados del FMECA, la definición de nodos y parámetros clave, el análisis de desviaciones y el desarrollo de acciones correctivas y medidas de seguridad.

Complementar el plan de mantenimiento con la gestión de recursos e inventariado de repuestos, lograría minimizar los tiempos de inactividad ligados a esta área, disminuyendo los tiempos de respuesta y levante de los equipos, lo que mejoraría la mantenibilidad.

Bibliografía

- [1] Arcadis Chile, “MANUAL DE OPERACIÓN – DESCRIPCIÓN GENERAL”, Codelco. [Documento Interno]. Santiago, Región Metropolitana, Chile: Codelco, 2013.
- [2] J. Moubray, “Reliability-centered Maintenance” Second Edition, Industrial Press Inc, 1997.
- [3] Codelco, “División Salvador”, Corporación Nacional del Cobre de Chile, s. f. [En línea]. Disponible en <https://www.codelco.com/salvador>.
- [4] United States Environmental Protection Agency, “Lean Thinking and Methods - TPM”, 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.epa.gov/sustainability/lean-thinking-and-methods-tpm#:~:text=Total%20Productive%20Maintenance%20\(TPM\)%20seeks,by%20reducing%20mistakes%20and%20accidents](https://www.epa.gov/sustainability/lean-thinking-and-methods-tpm#:~:text=Total%20Productive%20Maintenance%20(TPM)%20seeks,by%20reducing%20mistakes%20and%20accidents).
- [5] Fiix, “Reliability centered maintenance (RCM)”, s. f. [En línea]. Disponible en: [https://fiixsoftware.com/maintenance-strategies/reliability-centered-maintenance/#:~:text=Reliability%20centered%20maintenance%20\(RCM\)%20is,each%20of%20the%20facility's%20assets](https://fiixsoftware.com/maintenance-strategies/reliability-centered-maintenance/#:~:text=Reliability%20centered%20maintenance%20(RCM)%20is,each%20of%20the%20facility's%20assets).
- [6] International Journal of Engineering Research and Applications, “What are the main differences and similarities between TPM and RCM”, vol. 12, no. 6, pp. 56-70, Jun, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.ijera.com/papers/vol12no6/Ser-3/G1206035670.pdf>
- [7] Aladon, Soporte & Compañía, “Casos de éxito en RCM2”, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://soporteycia.com/>
- [8] F. Silva, et al., “RCM3 Methodology Application to Armored Military Vehicle Cooling System”, vol. 7, no. 4, pp. 46-60, Nov, 2021.[En línea]. Disponible en: https://journalengineering.fe.up.pt/index.php/upjeng/article/view/2183-6493_007-004_0004/566
- [9] A. Crespo Márquez y C. Parra Márquez, “Aplicación piloto de la metodología Mantenimiento Centrado en Fiabilidad/MCF (Reability Centered Maintenance/RCM) en el sistema de generación eléctrica: Motor Isotta V1312 ME 1800”, Sevilla 2008. [En línea]. Disponible en: www.confiableidadoperacional.com
- [10] T. L. Saaty, “Decision Making with the Analytic Hierarchy Process”, Int. J. Services Sciences, vol. 1, no. 1, pp. 83-98, 2008.
- [11] V. Gonzalez-Prida-Diaz y A. Crespo-Marquez, “After-Sales Service of Engineering Indus-

- trial Assets. A Reference Framework for Warranty Management”, Springer Verlag, 2014. ISBN: 978-3-319-03709-7.
- [12] R. Pascual, G. Del Castillo, D. Louit and P. Knights, “Business-oriented prioritization: A novel graphical technique”, Reliability Engineering and System Safety, (in press).
- [13] C. Parra, “Curso: MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (MCC). RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE (RCM)”, 2008. [En línea]. Disponible en: www.ingeman.net
- [14] M. Basson, “RCM3: Risk-Based Reliability Centered Maintenance” Third Edition, Industrial Press Inc, 2018.
- [15] W. E. Vesely, F. F. Goldberg, N. H. Roberts, y D. F. Haasl, “Fault Tree Handbook”, NUREG-0492, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 1981.
- [16] IEC61882, “Hazard and Operability Studies (HAZOP-Studies) - Application Guide”, International Electrotechnical Commission, Geneva, 2001.
- [17] R. J. Latino y K. C. Latino, “Root Cause Analysis: Improving Performance for Bottom Line Results”, Second Edition, CRC Press, 2002.
- [18] J.C. Ovalles Acosta, V. Gisbert Soler, y A.I. Pérez Molina, “Herramientas para el análisis de causa raíz (ACR)”, 3C Empresa: investigación y pensamiento crítico, Edición Especial, pp. 1-9, 2017.
- [19] M. Modarres, M. P. Kaminskiy and V. Krivtsov, “RELIABILITY ENGINEERING and RISK ANALYSIS A Practical Guide”, Third Edition, 2017.
- [20] R. S. Kaplan and D. P. Norton, “The Balanced Scorecard”, Boston, MA: Harvard Business School Press, 1996.
- [21] A. Mora Gutiérrez, “Mantenimiento: Planeación, ejecución y control”, Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México, 2009.
- [22] W. Weibull, “A statistical distribution function of wide applicability”, Journal of Applied Mechanics, vol. 18, no. 3, pp. 293-297, 1951.
- [23] Estándar Europeo. “Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural - recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos (ISO14224:2016)”, 2016. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/44518114/ISO_14224_espa%C3%Blol?auto=citations&from=cover_page
- [24] C. Parra y A. Crespo, “Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos”, segunda edición, Ingeman, 2015.
- [25] Comisión Chilena del Cobre, “Cochilco dio a conocer los principales hitos de su gestión año 2023 y desafíos”, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cochilco.cl/Paginas/Sala-de-Prensa/Noticias.aspx?ID=709>
- [26] ISO 9001:2015 - Quality management systems - Requirements, International Organization for Standardization, 2015.

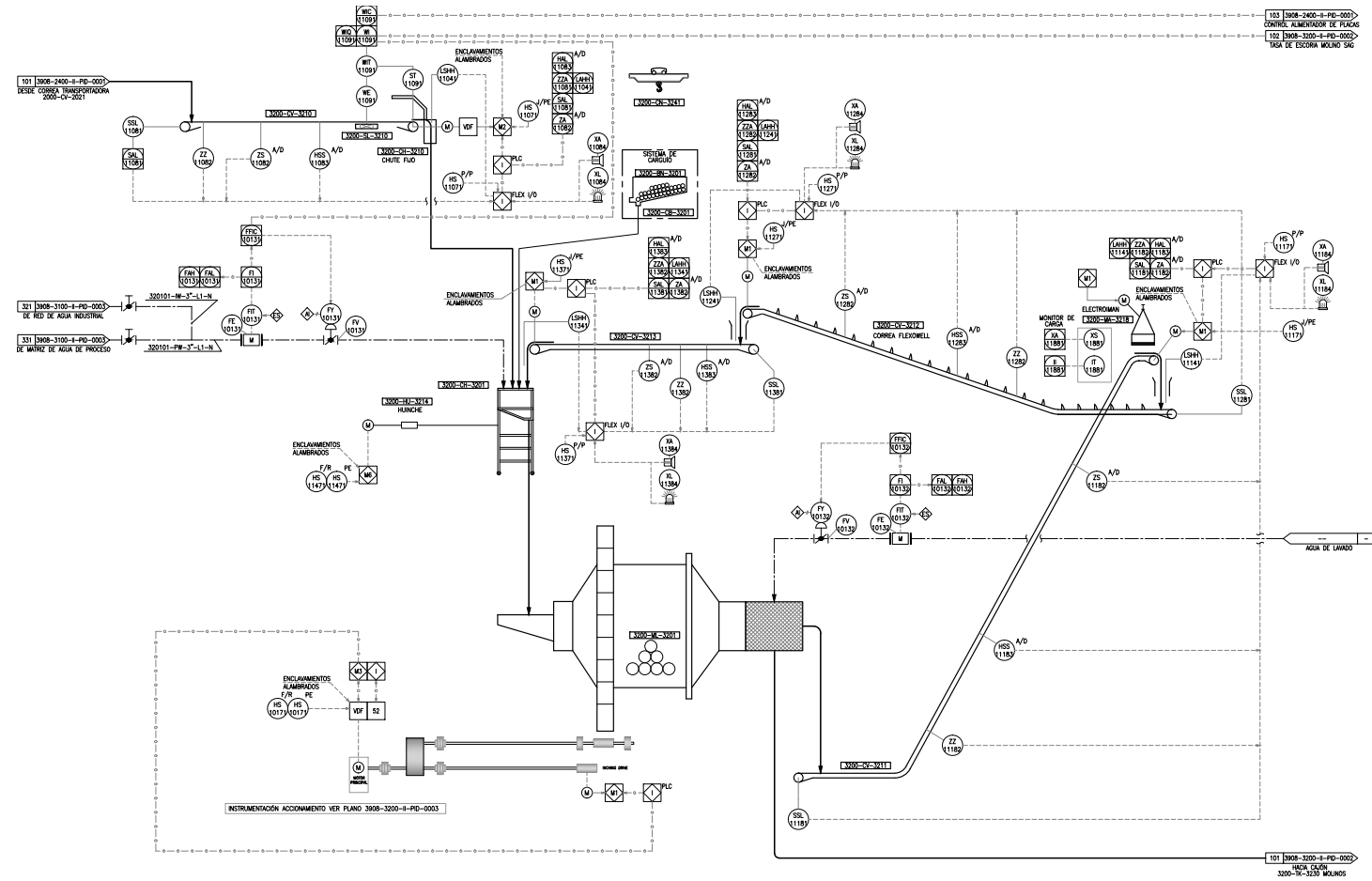
- [27] METEOCHILE, “Dirección Meteorológica de Chile, Servicios Climáticos”, s. f. [En línea]. Disponible en <https://climatologia.meteochile.gob.cl/>
- [28] Metso, “SELECT™ HORIZONTAL GRINDING MILLS”, s. f. [En línea]. Disponible en <https://www.metso.com/portfolio/select-mills/>
- [29] Outotec, “Manual de Instrucción de Molino Outotec Pty Ltd.”, Molino SAG – 4,88m DIA x 2,44m EGL (1.100kW), Codelco. [Documento Interno]. Antofagasta, Chile: Codelco, 2013.
- [30] Outotec, “Manual de Instrucción de Molino Outotec Pty Ltd.”, Molino de Bolas – 4,5m DIA x 7,6m EGL (2.500kW), Codelco. [Documento Interno]. Antofagasta, Chile: Codelco, 2013.
- [31] Ministerio de Minería, “DECRETO 132 Aprueba reglamento de seguridad minera”, BCN, 2004. [En línea]. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=221064>
- [32] Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), “Normas de emisión”, Gobierno de Chile, s.f. [En línea]. Disponible en: <https://portal.sma.gob.cl/index.php/portal-regulados/instructivos-y-guias/normas-de-emision/#835d133140affcdfa>
- [33] Ministerio de Salud, “DECRETO 594 Aprueba reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo”, BCN, 2000. [En línea]. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=167766>
- [34] Ministerio del Trabajo y Previsión Social, “LEY 16744 Establece normas sobre accidentes del trabajo y enfermedades profesionales”, BCN, 1968. [En línea]. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=28650>
- [35] Outotec, “Ball Mill 3200-ML-3221 Potrerillos, Chile Ball Mill 3200-ML-3221 Control Philosophy”, Codelco. [Documento Interno]. Potrerillos, Chile: Codelco, 2012.
- [36] I. A. Zamora, “Diseño de un plan de mantenimiento para un molino de bolas de la empresa Compañía Minera Cerro Negro S. A.”, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Quilpué, 2018. [En línea]. Disponible en: http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-9500/UCC9690_01.pdf
- [37] I. J. Brito y T. Velásquez, “Propuesta de mejora a plan de mantenimiento de un equipo de alta criticidad de área de chancado y molienda, Planta Pullalli, Cemin”, Universidad Técnica Federico Santa María, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.usm.cl/server/api/core/bitstreams/913eb7f9-2688-43be-a0aa-55fba79afa75/content>
- [38] SKF, “Daño de rodamientos y análisis de fallas”, Grupo SKAF, 2017. [En línea] Disponible en: https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d196807d76f8/pdf_preview_medium/0901d196807d76f8_pdf_preview_medium.pdf#cid-297619
- [39] Metso Minerals, “Molino Semi Molino Semi-Autógeno SAG 40’ Autógeno SAG 40’ x 25 5’ x 25.5’ Molinos de Bolas 24 Molinos de Bolas 24 x 36’”, Metso Minerals, s. f. [En línea].

Disponible en: file:///C:/Users/sandr/Downloads/curso-molino-sag-y-bolas_compress.pdf

- [40] K. F. Sovero, “DETERMINACIÓN DE FALLAS DEL MOLINO DE BOLAS 9 ft X 12 ft EN LA PLANTA CONCENTRADORA DE LA UNIDAD MINERA CHUNGAR”, Universidad Nacional del Centro del Perú, 2022. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/8016/T010_71817248_T.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- [41] F. A. Yalli, “Análisis de las causas de fallas de operación del variador de frecuencia del molino en la Sociedad Minera El Brocal para mejorar su confiabilidad”, Universidad Nacional del Centro del Perú, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/6447>
- [42] Select Laser Tracker, What is a Laser Tracker?, s. f. [En línea]. Disponible en: <https://selectlaseralignment.com/what-is-a-laser-tracker/>
- [43] Metso. “MillMapper: Monitoreo del desgaste del revestimiento”, s. f. [En línea]. Disponible en: <https://www.metso.com/es/portafolio/millmapper-monitoreo-del-desgaste-del-revestimiento/>
- [44] Honeywell, “Sensores RTD, Serie HEL-700”, s. f. [En línea]. Disponible en: <https://sps.honeywell.com/mx/es/products/advanced-sensing-technologies/industrial-sensing/industrial-sensors/temperature-sensors/rtd-sensors/hel-700-series>
- [45] Metso, “Sistema analizador de partículas en línea RockSense”, s.f. [En línea]. Disponible en: <https://www.metso.com/es/portafolio/sistema-analizador-de-particulas-en-linea-rocksense/>
- [46] Metso, “Sistema de sensor de carga del molino MillSense”, s.f. [En línea]. Disponible en: <https://www.metso.com/es/portafolio/sistema-de-sensor-de-carga-del-molino-millsense/>
- [47] Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, “Calmly: IA para el mantenimiento predictivo de equipamientos”, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ingenieria.uchile.cl/noticias/210791/calmly-ia-para-el-mantenimiento-predictivo-de-equipamientos>
- [48] Lanner, “Pasarela IoT: Integración de PLC con IoT”, s.f. [En línea]. Disponible en: <https://www.lanner-america.com/es/blog-es/pasarela-iot-integracion-de-plc-con-iot/>

Anexos

Anexo A. Diagramas P&ID de los molinos y su entorno circundante



103

PLANO N°	DESCRIPCIÓN	3200-CY-3210				3200-CY-3211				3200-CY-3212				3200-CY-3213				3200-CH-3210				3200-CH-3201				3200-SL-3210				3200-BN-3201			
		ITEM	DESIGN	REVIS	JEFE INCL.	ITEM	DESIGN	REVIS	JEFE INCL.	ITEM	DESIGN	REVIS	JEFE INCL.	ITEM	DESIGN	REVIS	JEFE INCL.	ITEM	DESIGN	REVIS	JEFE INCL.	ITEM	DESIGN	REVIS	JEFE INCL.	ITEM	DESIGN	REVIS	JEFE INCL.				
3908-3200-PI-01-001-B	DIAGRAMA DE FLUJO Y MANEJO DE MORGES	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

PLANO N°	DESCRIPCIÓN	ITEM	DESIGN	REVIS	JEFE INCL.	DESCRIPCIÓN	ITEM	DESIGN	REVIS	JEFE INCL.	DESCRIPCIÓN	ITEM	DESIGN	REVIS	JEFE INCL.	DESCRIPCIÓN	ITEM	DESIGN	REVIS	JEFE INCL.
A	10.04.01.2	N/A	N/A	J.A.		COORDINACIÓN INTERNA					PROYECTO	H. AMARAL	04.04.12							
B	04.04.12	N/A	N/A	J.A.		REVISIÓN Y APROBACIÓN CLIENTE					DESIGN	H. AMARAL	04.04.12							
											JEFE OPERANDO	M. ARAYA	04.04.12							
											JEFE INGENIERO	J. BARRO	04.04.12							

SECCION	FECHA	N° PROYECTO	EXCMA	REVISION
EPSC PLANTA TRATAMIENTO FLOTACION ESCORRAS CI MONTAJE Y PUESTA EN MARCHE DEL SISTEMA LIMPIEZA DE ESCORRAS MOLINO SAG Y MANEJO DE PEBERLES DIAGRAMA P&ID	MARZO 2012	3908	N/A	B

Figura 6.1: Diagrama P&ID de la sección del Molino SAG.

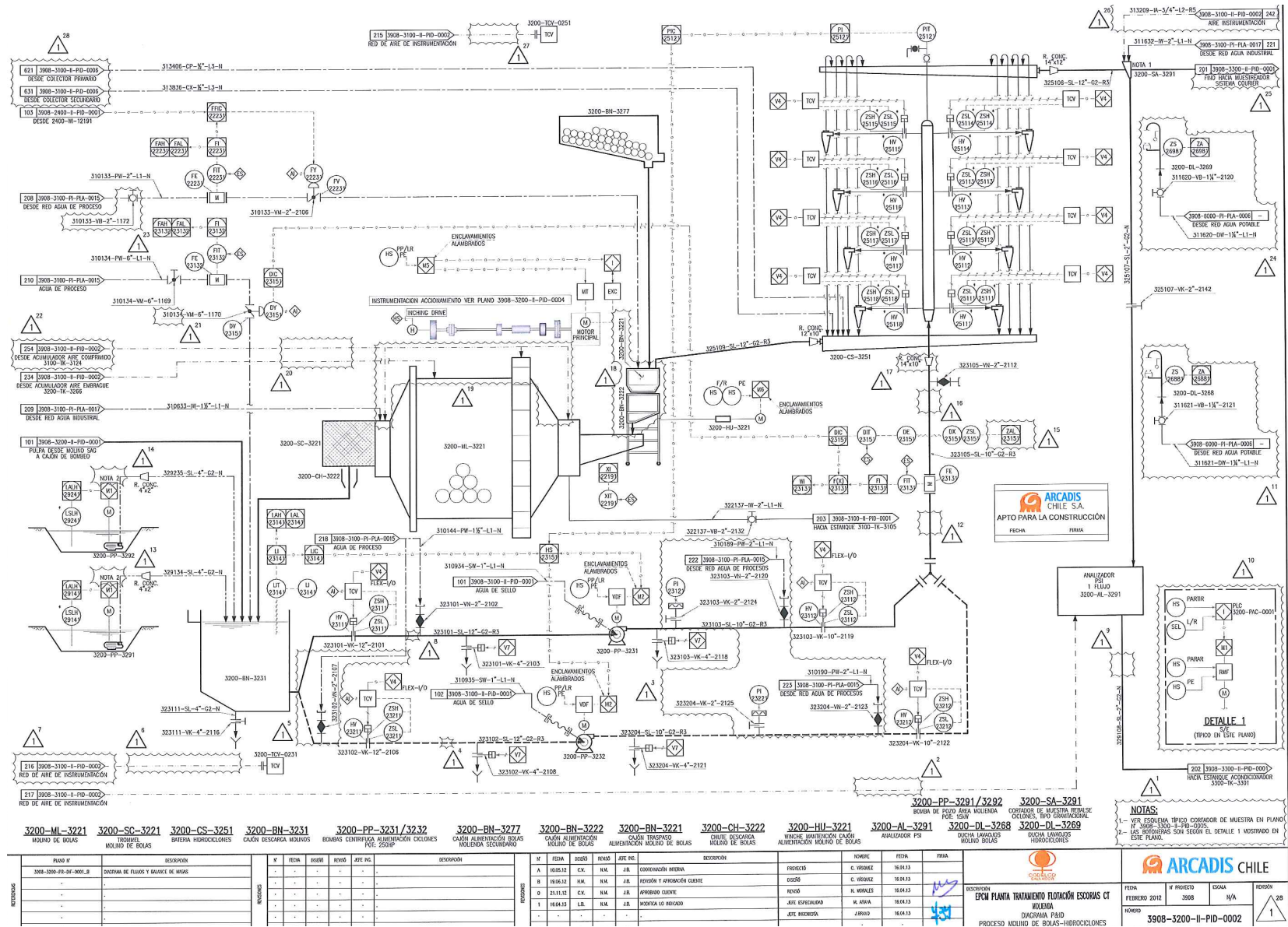


Figura 6.2: Diagrama P&ID de la sección del Molino de bolas.

Anexo B. Diagramas P&ID de detalle de los molinos

105

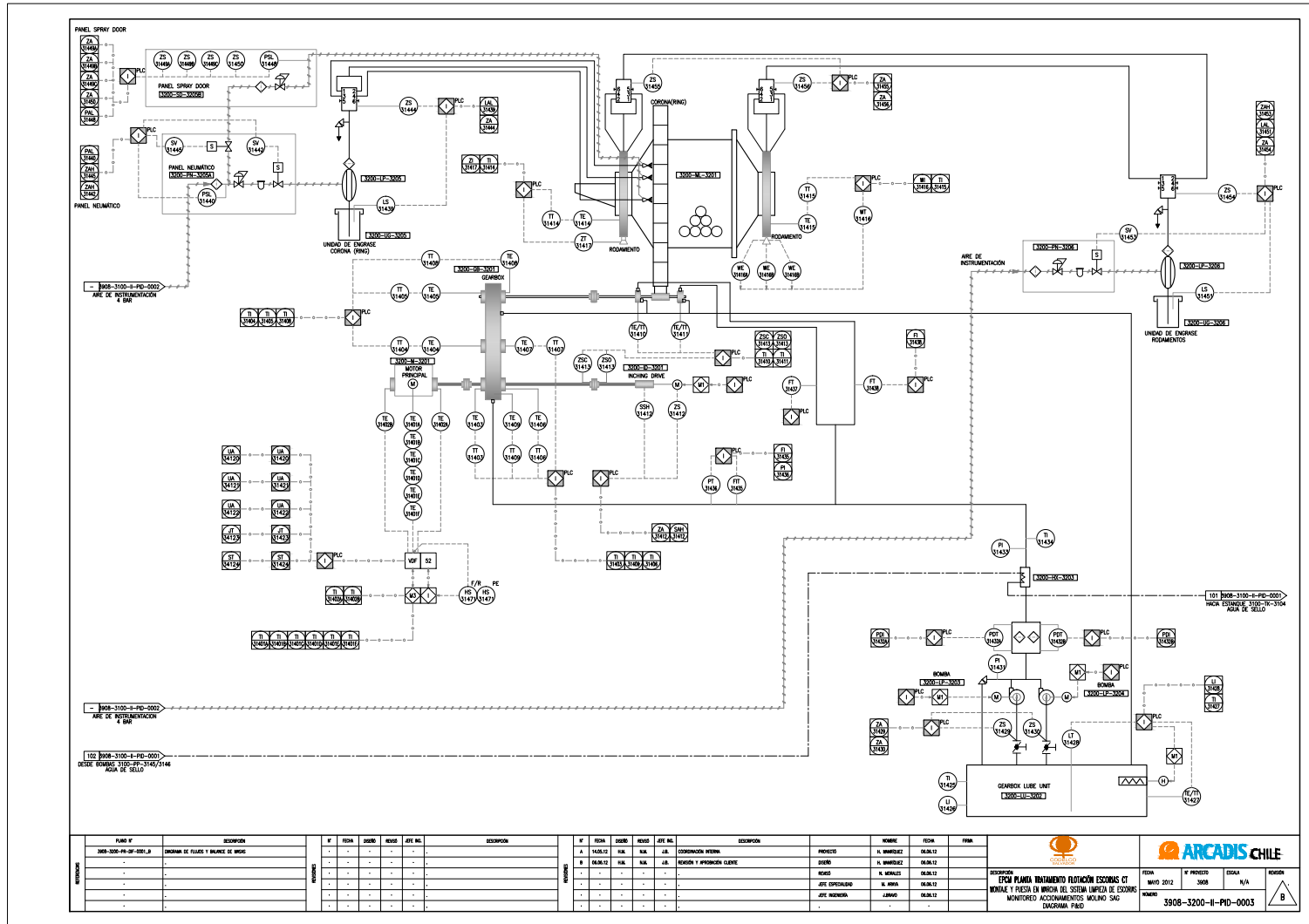


Figura 6.3: Diagrama P&ID en detalle del Molino SAG.

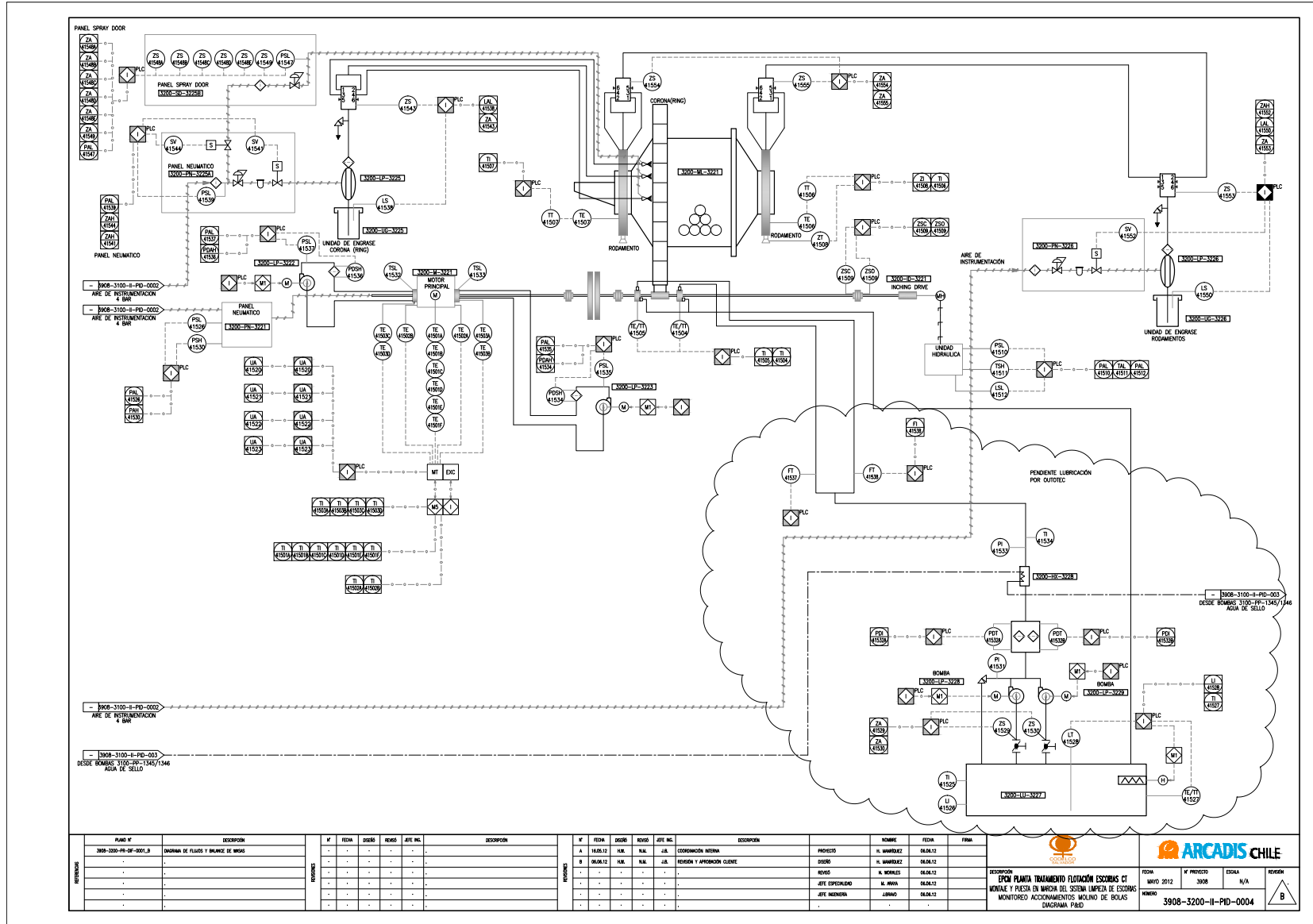


Figura 6.4: Diagrama P&ID en detalle del Molino de Bolas.

Anexo C. Tablas de riesgo de los molinos

Molino de bolas											T rep	C mtto	PI
Componente	Estado de falla	Causa	P	SS	MA	OPA	OPL	OPS	Con	Riesgo	[H]	[USD]	[TMS]
1	1	A	1	4	4	1	4	2	4	10	18,15	16379,78	181,69
		B	3	2	3	1	2	1	3	13	6,78	3175,03	67,91
	2	A	2	4	4	1	4	2	4	14	18,15	16379,78	181,69
2	1	A	4	3	3	5	2	1	5	24	445,54	25572,32	4460,20
		B	1	3	3	5	3	2	5	15	18,15	154073,91	181,69
		C	3	5	4	5	5	2	5	22	18,15	154073,91	181,69
		D	3	2	3	1	2	1	3	13	6,78	5454,48	67,91
	2	A	2	4	4	5	4	2	5	19	18,15	154073,91	181,69
3	1	A	2	5	4	3	5	2	5	19	3,75	58893,96	37,54
	2	A	2	4	4	3	4	2	4	14	3,75	58893,96	37,54
		B	4	3	3	5	3	1	5	24	445,54	30256,50	4460,20
4	1 Y 2	A	2	3	3	4	3	1	4	14	9,87	118843,32	98,77
5	1	A	4	2	1	4	2	1	4	21	38,31	80356,03	383,48
		B	3	1	3	4	3	1	4	18	6,78	80356,03	67,91
	2	A	4	2	2	4	2	1	4	21	2,00	80356,03	20,02
		B	3	3	2	1	3	1	3	13	1,20	5477,11	11,98
	3	A	3	3	3	4	3	1	4	18	6,78	80356,03	67,91
	4	A	3	3	3	3	3	2	3	13	3,01	62637,40	30,14
6	1	A	4	3	2	1	3	2	3	17	2,60	1071,57	26,03
		B	2	5	4	2	5	3	5	19	1,41	31338,76	14,13
		C	3	4	3	1	4	2	4	18	1,20	5477,11	11,98
		D	4	3	2	3	3	2	3	17	1,58	68645,26	15,77
		E	2	2	2	2	2	2	2	5	3,97	32844,15	39,71
7	1	A	4	2	3	1	2	1	3	17	2,63	15078,82	26,34
		B	4	2	3	1	2	1	3	17	2,97	15078,82	29,72
		C	3	2	3	3	2	1	3	13	193,85	23468,51	1940,62
		D	2	3	4	1	3	1	4	14	18,15	16379,78	181,69
		E	2	3	3	1	3	1	3	9	0,27	17218,08	2,67
8	1	A	4	2	3	1	2	1	3	17	2,63	13008,23	26,34
		B	4	2	3	1	2	1	3	17	2,97	13008,23	29,72
		C	3	2	3	3	2	1	3	13	193,85	23468,51	1940,62
		D	3	1	2	1	1	1	2	8	3,97	796,13	39,71
9	1	A	3	3	3	1	3	2	3	13	3,97	796,13	39,71
	2	A	3	2	2	1	2	2	2	8	3,97	796,13	39,71
		B	2	2	2	1	2	2	2	5	3,97	20448,37	39,71
10	1	A	5	1	1	1	1	1	1	11	0,63	627,03	6,27
		B	3	2	1	2	2	1	2	8	23,09	32844,15	231,18
		C	4	2	1	1	2	1	2	12	23,09	9670,42	231,18
11	1	A	4	4	3	2	4	2	4	21	26,68	31745,86	267,03
		B	4	3	3	4	3	1	4	21	278,00	30256,50	2782,94
	2	A	4	4	3	2	4	2	4	21	26,68	31745,86	267,03
		B	5	4	3	2	4	1	4	23	51,42	9899,06	514,72
		C	3	3	3	2	3	2	3	13	26,68	31745,86	267,03

Figura 6.5: Tabla de riesgo de componentes del molino de bolas, parte 1.
Elaboración propia.

Componente	Estado de falla	Causa	P	SS	MA	OPA	OPL	OPS	Con	Riesgo	T rep [H]	C mnto [USD]	PI [TMS]
12	1	A	2	5	3	2	5	2	5	19	26,68	31745,86	267,03
	2	A	4	4	3	1	4	2	4	21	6,78	109,33	67,91
		B	4	3	3	5	3	1	5	24	445,54	30256,50	4460,20
13	1	A	3	2	2	1	2	1	2	8	2,73	4820,27	27,36
		B	3	2	2	1	2	2	2	8	1,86	399,39	18,62
		C	1	4	3	1	4	2	4	10	1,41	3232,16	14,13
		D	3	2	2	1	2	2	2	8	1,41	2438,11	14,13
		E	3	2	2	1	2	2	2	8	1,41	2438,11	14,13
		F	1	2	1	1	2	1	2	3	2,53	475,94	25,36
14	1	A	3	2	1	1	2	1	2	8	0,10	399,38	1,00
		B	3	2	1	1	2	1	2	8	0,10	399,38	1,00
		C	3	1	1	1	1	1	1	4	2,53	475,94	25,36
15	1	A	2	4	3	1	4	1	4	14	2,00	896,63	20,02
		B	4	3	3	1	3	1	3	17	3,31	1492,24	33,10
		C	3	3	3	1	3	2	3	13	1,12	1364,38	11,18
		D	3	4	2	1	4	2	4	18	0,94	1628,28	9,41
16	1	A	3	3	3	1	3	1	3	13	0,17	509,93	1,67
		A	3	3	3	1	3	2	3	13	1,12	1364,38	11,18
	2	B	2	3	3	1	3	2	3	9	6,78	109,33	67,91
		A	2	4	3	1	4	2	4	14	0,17	8551,98	1,67
	3	B	3	3	3	1	3	2	3	13	1,12	1364,38	11,18
		C	4	3	3	1	3	1	3	17	3,31	1492,24	33,10
17	1 Y 2	A	3	3	3	1	3	1	3	13	16,12	17873,20	161,34
18	1	A	4	3	3	1	3	1	3	17	3,31	1492,24	33,10
19	1	A	3	3	1	2	3	1	3	13	16,12	26374,19	161,34
20	1	A	4	4	2	1	4	2	4	21	0,94	2825,06	9,41
		B	2	4	1	1	4	2	4	14	3,80	3057,50	38,04
	2	A	2	4	1	1	4	1	4	14	3,80	3057,50	38,04
21	1	A	4	1	2	1	1	1	2	12	0,94	2825,06	9,41
		B	3	2	1	1	2	1	2	8	6,18	3308,52	61,90
	2	A	4	3	2	1	3	1	3	17	1,20	5477,11	11,98
		A	3	3	1	1	3	1	3	13	6,18	3308,52	61,90
22	1	A	4	4	3	1	4	2	4	21	2,92	8422,65	29,18
		B	3	4	3	1	4	2	4	18	2,92	11694,23	29,18
		C	4	3	3	1	3	2	3	17	6,96	7498,87	69,64
		D	4	3	3	1	3	2	3	17	2,92	11980,51	29,18
23	1	A	4	2	3	1	2	2	3	17	1,20	6707,53	12,04
		B	3	2	1	1	2	1	2	8	0,52	169,46	5,19
		C	3	2	3	1	2	2	3	13	1,26	7501,55	12,63
		D	4	3	3	1	3	2	3	17	1,28	5629,58	12,86
		E	4	2	3	1	2	2	3	17	0,64	4434,22	6,40
24	1	A	4	2	2	1	2	2	2	12	1,86	4406,63	18,62
		B	3	2	2	1	2	2	2	8	0,64	12204,87	6,37
		C	4	3	2	1	3	2	3	17	3,93	1617,69	39,30
		D	4	2	2	1	2	2	2	12	2,29	6748,10	22,90

Figura 6.6: Tabla de riesgo de componentes del molino de bolas, parte 2.
Elaboración propia.

Molino SAG													
Componente	Estado de falla	Causa	P	SS	MA	OPA	OPL	OPS	Con	Riesgo	T rep [H]	C mnto [USD]	PI [TMS]
1	1	A	2	5	4	1	5	2	5	19	18,15	16379,78	181,69
		B	3	2	3	1	2	1	3	13	1,13	3175,03	11,26
	2	A	3	4	4	1	4	2	4	18	18,15	16379,78	181,69
2	1	A	3	3	3	5	2	1	5	22	445,54	16162,71	4460,20
		B	1	4	3	5	4	2	5	15	18,15	154073,91	181,69
		C	3	5	4	5	5	2	5	22	18,15	154073,91	181,69
		D	4	2	3	1	2	1	3	17	0,81	2436,28	8,13
	2	A	2	4	4	5	4	2	5	19	18,15	154073,91	181,69
3	1	A	2	5	4	1	5	2	5	19	3,75	19923,39	37,54
	2	A	3	4	4	1	4	2	4	18	3,75	19923,39	37,54
		B	3	3	3	5	3	1	5	22	445,54	16162,71	4460,20
4	1 Y 2	A	4	4	3	4	3	1	4	21	24,58	87778,55	246,10
5	1	A	4	2	3	3	3	1	3	17	38,31	61524,17	383,48
		B	3	3	3	3	3	1	3	13	36,02	61524,17	360,59
	2	A	4	2	3	3	2	1	3	17	38,31	61524,17	383,48
		B	3	3	2	1	3	1	3	13	0,46	5477,11	4,57
	3	A	3	3	3	3	3	1	3	13	36,02	61524,17	360,59
	4	A	4	4	3	1	4	2	4	21	3,01	2549,73	30,14
6	1	A	3	3	1	1	3	2	3	13	2,60	1071,57	26,03
		B	2	5	4	2	5	3	5	19	1,41	31338,76	14,13
		C	5	4	3	1	4	2	4	23	0,46	5477,11	4,57
		D	3	3	2	3	3	2	3	13	1,58	68645,26	15,77
		E	3	2	2	2	2	2	2	8	3,97	32844,15	39,71
7	1	A	4	3	1	1	3	1	3	17	10,63	4049,42	106,39
		B	3	3	2	1	3	2	3	13	10,63	796,13	106,39
		C	3	3	2	1	3	2	3	13	10,63	20448,37	106,39
8	1	A	4	2	3	1	2	1	3	17	2,63	15078,82	26,34
		B	4	2	3	1	2	1	3	17	2,97	15078,82	29,72
		C	3	2	3	3	2	1	3	13	193,85	23468,51	1940,62
		D	2	4	4	1	4	1	4	14	18,15	16379,78	181,69
		E	2	3	3	1	3	1	3	9	0,27	17218,08	2,67
9	1	A	4	2	3	1	2	1	3	17	2,63	13008,23	26,34
		B	4	2	3	1	2	1	3	17	2,97	13008,23	29,72
		C	3	2	3	3	2	1	3	13	193,85	23468,51	1940,62
		D	4	1	2	1	1	1	2	12	3,97	796,13	39,71
10	1	A	3	3	3	1	3	2	3	13	3,97	796,13	39,71
	2	A	3	2	2	1	2	2	2	8	3,97	796,13	39,71
			B	2	2	2	1	2	2	5	3,97	20448,37	39,71
11	1	A	3	4	3	2	4	2	4	18	26,68	31745,86	267,03
		B	3	3	3	4	3	1	4	18	278,00	30256,50	2782,94
	2	A	3	4	3	2	4	2	4	18	26,68	31745,86	267,03
		B	4	4	3	1	4	1	4	21	0,45	5138,62	4,55
		C	2	3	3	2	3	2	3	9	26,68	31745,86	267,03
12	1	A	2	5	3	2	5	2	5	19	26,68	31745,86	267,03
	2	A	4	4	3	1	4	2	4	21	1,13	109,33	11,26
		B	3	3	3	5	3	1	5	22	445,54	30256,50	4460,20

Figura 6.7: Tabla de riesgo de componentes del molino SAG, parte 1. Elaboración propia.

Componente	Estado de falla	Causa	P	SS	MA	OPA	OPL	OPS	Con	Riesgo	T rep [H]	C mnto [USD]	PI [TMS]
13	1	A	3	2	1	1	2	2	2	8	2,73	1071,57	27,36
		B	2	4	4	1	4	2	4	14	1,41	3152,93	14,13
		C	3	3	3	1	3	2	3	13	0,46	3152,93	4,57
		D	2	2	2	1	2	2	2	5	1,58	3152,93	15,77
		E	3	2	2	1	2	2	2	8	3,97	475,94	39,71
14	1	A	3	2	1	1	2	1	2	8	0,10	399,38	1,00
		B	3	2	1	1	2	1	2	8	0,10	399,38	1,00
		C	4	1	1	1	1	1	1	7	2,07	475,94	20,69
15	1	A	4	4	3	1	4	1	4	21	2,00	896,63	20,02
		B	4	3	3	1	3	1	3	17	3,57	1906,54	35,74
		C	3	3	3	1	3	2	3	13	2,68	1207,11	26,86
		D	4	4	3	1	4	2	4	21	0,80	1628,28	7,98
16	1	A	3	4	3	1	4	1	4	18	0,17	5127,23	1,67
		B	3	3	3	1	3	2	3	13	1,12	1364,38	11,18
	2	A	1	3	3	1	3	2	3	6	1,13	109,33	11,26
		B	3	4	3	1	4	2	4	18	0,17	12730,90	1,67
	3	A	3	3	3	1	3	2	3	13	1,12	358,52	11,18
		C	4	3	3	1	3	1	3	17	3,99	4421,90	39,93
17	1 Y 2	A	3	3	3	2	3	1	3	13	3,37	28693,18	33,70
18	1	A	5	3	3	1	3	1	3	20	4,01	2496,42	40,13
19	1	A	3	3	1	2	3	1	3	13	16,12	33228,67	161,34
20	1	A	4	4	2	1	4	2	4	21	0,80	2825,06	7,98
		B	3	4	1	1	4	2	4	18	3,80	3199,53	38,04
	2	A	2	4	1	1	4	1	4	14	3,80	3199,53	38,04
21	1	A	4	1	2	1	1	1	2	12	0,92	2825,06	9,26
		B	5	2	1	1	2	1	2	16	1,27	6574,21	12,74
	2	A	4	3	2	1	3	1	3	17	0,46	5477,11	4,57
		B	5	3	1	1	3	1	3	20	13,99	6574,21	140,01
22	1	A	4	4	3	1	4	2	4	21	0,42	5670,33	4,25
		B	3	4	3	1	4	2	4	18	0,48	5544,91	4,84
		C	4	3	3	1	3	2	3	17	0,48	5157,90	4,84
		D	4	3	3	1	3	2	3	17	0,42	4181,34	4,25
23	1	A	4	2	3	1	2	2	3	17	2,80	6147,13	28,01
		B	3	2	1	1	2	1	2	8	1,98	125,59	19,87
		C	3	2	3	1	2	2	3	13	2,80	6006,23	28,01
		D	5	3	3	1	3	2	3	20	1,48	5838,17	14,80
		E	4	2	3	1	2	2	3	17	2,80	3483,59	28,01
24	1	A	4	2	2	1	2	2	2	12	1,86	5051,12	18,62
		B	3	2	2	1	2	2	2	8	0,64	4818,60	6,37
		C	4	3	2	1	3	2	3	17	3,93	1261,32	39,30
		D	4	2	2	1	2	2	2	12	2,29	4653,75	22,90

Figura 6.8: Tabla de riesgo de componentes del molino SAG, parte 2. Elaboración propia.

Anexo D. Diagrama FMECA del molino de bolas

Equipo	Sistema	Componente	Función	Estado de falla	Modo de falla				Efectos de falla				Riesgo inherente												
					Causa	Mecanismo	Efecto local	Efecto del siguiente nivel superior	Efecto final	Efecto potencial en el peor de los casos	Pted	P	C	R											
1	Carcasa	A	Contener los medios de molienda y el material, además de proporcionar el soporte estructural para los revestimientos internos	1 No contiene la carga	A	Grietas o fisuras de las placas de la carcasa	1	Fatiga de las placas	Fugas de pulpa a través de las grietas, que deterioran el exterior de la carcasa, provocando corrosión y aumento de su tamaño hasta el eventual desprendimiento de la placa.	La carcasa pierde estructura, generando caída de revestimientos y pérdida de carga, lo que provoca desbalanceo del molino, deformación o fractura de la carcasa, rotura de bolas, desgaste de las bombas del cajón, aumento de vibraciones en los rodamientos y engranajes causando desalineamiento y sobrecalentamiento. Esto activa interruptores de posición y temperatura, disparando las alarmas.	El derrame de carga compromete gravemente la seguridad del personal y la zona de cimientos. Se detiene el molino para reparación y cambio de placas, revestimientos, bolas y el alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	El fallo de la protección resultaría en el colapso catastrófico de los rodamientos, piñón y corona, provocando la avería del motor por el desalineamiento y aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves al personal. También, se debilitan los cimientos, comprometiendo la estabilidad estructural. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	1	4	10										
							2	Sobrecarga de alimentación en el molino																	
							3	Desalineamiento del cilindro con el eje del molino																	
							4	Impactos en las placas de la carcasa																	
							5	Abrasión debido al material o al efecto de Pulp Racing*																	
							6	Desgaste de los revestimientos																	
							7	Corrosión																	
							2 No es capaz de sostener los revestimientos	B								Desgaste o rotura de empaquetaduras de los pernos de sujeción de los revestimientos	1	Impactos en los revestimientos	La unión del perno pierde integridad, presentando fugas de pulpa, provocando corrosión en la carcasa y que se sueltan los revestimientos hasta su desprendimiento.	El desprendimiento del revestimiento genera desequilibrio en el molino, aumentando el desgaste de revestimientos y bolas, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se propaga la corrosión, aumentando las fugas y vibraciones, afectando los rodamientos, engranajes, causando desalineación, elevando las temperaturas, lo que activa las alarmas.	El derrame de carga compromete la seguridad del personal y la zona de cimientos. Se detiene el molino para reparación y cambio de revestimientos, placas, bolas, empaquetaduras, pernos y el alineamiento de componentes, implicando costos de producción y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos, piñón y corona, provocando la avería del motor por el desalineamiento y aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves al personal. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	3	13
																	2	Vibraciones excesivas							
				3	Corrosión																				
				4	Fricción debido al movimiento rotativo del molino																				
				5	Estrés excesivo por mal torque de pernos																				
				3 No es capaz de sostener los revestimientos	A	Desgaste, deformación o fractura de la estructura de la carcasa	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Soltura y desalineamiento de juntas y revestimientos, presentando fugas de pulpa en juntas, sellos y fracturas de la carcasa, que corroen la estructura y sujeciones, llegando incluso al desprendimiento de los revestimientos.	Se genera desbalanceo en el molino, lo que incrementa el desgaste de la carcasa, sujeciones y revestimientos, resultando en un aumento de fugas, reduciendo la eficiencia de molienda y calidad del producto, además de aumentar el desgaste de las bombas del cajón y vibraciones, afectando a los rodamientos y engranajes, provocando su desalineamiento y aumento de temperaturas, lo que activa las alarmas de posición y temperatura.	El derrame de carga compromete la seguridad del personal y en la zona de cimientos. Se detiene la producción para el cambio de revestimientos, sello, placas, pernos y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos, piñón y corona, provocando la avería del motor por el desalineamiento y aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves. También, se debilitan los cimientos, comprometiendo la estabilidad estructural. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	2	4	14										
							2	Desalineamiento del cilindro con el eje del molino																	
							3	Impactos en la estructura de la carcasa																	
							4	Corrosión																	
							5	Abrasión debido al material o al efecto de Pulp Racing*																	
							6	Desgaste de los revestimientos																	
7	Fatiga de la estructura de la carcasa																								
2	Cabezales	B	Formar y sellar los extremos del molino, actuar como barrera física de protección para contener el material y proporcionar soporte a los revestimientos	1 No brinda sello a los extremos del cilindro y no contiene la carga	A	Desalineamiento del cabezal con la carcasa y los muñones	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Fricción y temperatura en las juntas de la carcasa y muñones, debido al contacto irregular, resultando en desgaste de sellos y empaquetaduras, vibraciones, ruidos anormales en el molino y fugas leves de lubricante.	Aumenta el desgaste de los sellos, presentando fugas de agua o pulpa alrededor de las juntas, junto con incremento de vibraciones en los apoyos, distribuyendo las cargas desigualmente en los muñones, elevando el riesgo de desgaste y fracturas en las juntas con el cabezal. El desequilibrio se transmite a los engranajes y rodamientos, aumentando las temperaturas y el movimiento, lo que activa los interruptores y alarmas.	Las fugas representan un riesgo para la seguridad de las personas e impactan en la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se detiene la producción para el cambio de sellos, empaquetaduras y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos, piñón, corona, deformación severa de las juntas y revestimientos, provocando la avería del motor por el desalineamiento y aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, mantenimiento y pérdidas por costos elevados de mantenimiento.	4	5	24										
							2	Impactos en el cilindro del molino																	
							3	Fatiga del material en las uniones																	
							4	Vibraciones excesivas debido a desgaste de los revestimientos o desbalanceo del molino																	
							5	Desgaste de los rodamientos principales																	
				2 No brinda sello a los extremos del cilindro y no contiene la carga	B	Grietas o fractura de las placas del cabezal	1	Fatiga del material de las placas	Fugas de pulpa a través de las grietas, que deterioran el exterior del cabezal y sus juntas con la carcasa, provocando corrosión y aumento de su tamaño hasta el eventual desprendimiento de la placa.	El cabezal pierde el sellado en los extremos e integridad estructural, generando caída, desgaste de revestimientos y pérdida de carga, lo que provoca desbalanceo del molino, aumentando las vibraciones en los rodamientos y engranajes, causando desalineamiento y sobrecalentamiento. Esto activa los interruptores de posición y temperatura, junto con las alarmas.	El derrame de carga compromete gravemente la seguridad del personal aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves. También, se debilitan los cimientos, comprometiendo la estabilidad estructural. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	1	5	15											
							2	Impactos en las placas del cabezal																	
							3	Desalineamiento con la carcasa y muñones																	
							4	Abrasión debido al material o al efecto de Pulp Racing*																	
							5	Sobrecarga de alimentación en el molino																	
3 No brinda sello a los extremos del cilindro y no contiene la carga	C	Desgaste o fractura de las uniones con la carcasa y los muñones	1	Acumulación de polvo o partículas abrasivas en las uniones	Microfisuras que debilitan la unión y aumentan las vibraciones del molino. Esto incrementa la presión y fricción, provocando quebres, deformaciones en la unión y aflojamiento de pernos, intensificando vibraciones y ocasionando fugas de pulpa.	El cabezal pierde sellado en los extremos, lo que provoca fugas y corrosión que debilitan la estructura de la unión, así como los sellos, cabezal y carcasa, aumentando las grietas y fracturas, lo que conduce al desalineamiento, generando vibraciones excesivas que afectan a los rodamientos, engranajes, ejes y acoples, provocando un desgaste prematuro y elevación de temperaturas, activando las alarmas.	Las fugas afectan la seguridad y la eficiencia de la molienda, requiriendo la detención de la producción para reparar y reemplazar sellos, empaquetaduras, pernos, placas y flanges, además de realinear componentes. Esto conlleva costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Rotura catastrófica de uniones, incapacidad de sostener el molino, derrames y riesgos de lesiones graves. Falla catastrófica de rodamientos, piñón, corona, cabezal y carcasa, averiando el motor y aumentando riesgos de incendio y lesiones. Esto implicaría una prolongada inactividad, pérdida de producción y altos costos de mantenimiento.	3	5	22														
			2	Fatiga del material de las uniones																					
			3	Corrosión																					
			4	Desalineamiento con la carcasa y muñones																					

Figura 6.9: Diagrama FMECA del molino de bolas, parte 1. Elaboración propia.

Estructural	Muñones de los cabezales	C	Proporcionar soporte al tambor funcionando como ejes de rotación, ubicados en los extremos para alojar los rodamientos principales	D	Desgaste de sellos o empaquetaduras de uniones y pernos de sujeción	1	Acumulación de polvo o partículas abrasivas en las uniones	La unión pierde integridad, presentando fugas leves de lubricante o pulpa alrededor de sellos y empaquetaduras, provocando corrosión y aflojamiento en pernos de la unión y revestimientos, que va corroyendo el cabezal, ocasionando soltura de los revestimientos hasta su desprendimiento.	Desalineamiento gradual del cabezal, desequilibrio en el molino, aumentando el desgaste de revestimientos y de bolas, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se propaga la corrosión, aumentando las fugas, resultando en vibraciones adicionales que afectan a los rodamientos y engranajes, causando desalineación e incremento de temperaturas, lo que activa interruptores y alarmas.	El derrame de carga continuo compromete la seguridad del personal y la zona de cimientos. Se detiene el molino para reparación y cambio de revestimientos, placas, bolas, sellos, empaquetaduras, pernos y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Fallo completo de los sellos y empaquetaduras de la unión y pernos de sujeción, provocando el colapso catastrófico de los rodamientos, piñón y corona, causando la avería del motor por el desalineamiento, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	3	13		
						2	Fricción debido al movimiento rotativo del molino									
						3	Corrosión									
						4	Vibraciones excesivas									
						5	Desalineamiento con la carcasa, muñones y pernos de sujeción									
					No es capaz de sostener los revestimientos	A	Desgaste, deformación o fractura de la estructura del cabezal	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Soltura y desalineamiento de juntas y revestimientos, presentando fugas de lubricante o pulpa en juntas y alrededor de pernos, provocando microfisuras en el cabezal que crecen hasta su fractura, corroyendo la estructura y sujeciones, llegando incluso al desprendimiento de los revestimientos.	Se genera desbalanceo en el molino, lo que incrementa el desgaste del cabezal, sujeciones y revestimientos, resultando en aumento de fugas, reduciendo la eficiencia de molienda y calidad del producto, además de aumentar el desgaste de las bombas del cajón e incrementar las vibraciones, afectando a los rodamientos y engranajes, provocando su desalineamiento, elevando sus temperaturas, lo que activa los interruptores y alarmas.	El derrame de carga compromete la seguridad del personal y la zona de cimientos. Se detiene la producción para reparación y cambio de revestimientos, sellos, placas, pernos y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico del cabezal, rodamientos, piñón y corona, provocando la avería del motor por el desalineamiento y aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves. También, se debilitan los cimientos, comprometiendo la estabilidad estructural. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	2	5	19
								2	Impactos en la estructura del cabezal							
								3	Desalineamiento con la carcasa y muñones							
								4	Corrosión							
								5	Fatiga del material de la estructura							
								6	Abrasión debido al material o al efecto de Pulp Racing*							
					3	Muñones de los cabezales	C	Proporcionar soporte al tambor funcionando como ejes de rotación, ubicados en los extremos para alojar los rodamientos principales	A	Desgaste, deformación o fractura de la estructura del muñón	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Se debilita la estructura del muñón y capacidad de soporte del cilindro, aumentando la tensión en el área de transición a la carcasa. Esto ocasiona ruidos anormales, vibraciones excesivas, fugas de pulpa a través de las fracturas, aumento de temperatura y desalineamiento con el cilindro.	Corrosión en la superficie que debilita la unión del muñón a la carcasa. Aumento del volumen de sólidos y bolas en el molino, incrementando el desgaste y riesgo de golpes en la carcasa, desgaste o rotura de las bolas y desgaste de revestimientos, implicando pérdida de eficiencia y calidad del producto. Esto genera aumento de las vibraciones y desalineamiento, afectando a los rodamientos, engranajes, ejes y acoples, al igual que sus temperaturas, activando las alarmas.	El derrame de carga compromete la seguridad del personal, de los rodamientos y sus soportes, aumentando su desgaste y desplazándose el molino, siendo de riesgo muy grave o fatal al personal. Además, causaría daños extensos en los rodamientos, sistema de transmisión y carcasa, conllevando en una reparación costosa y prolongada, así como en una pérdida significativa de producción.	2
2	Corrosión															
3	Fatiga del material de la estructura															
4	Desalineamiento con el cabezal															
5	Abrasión debido al material o al efecto de Pulp Racing*															
6	Impactos en la estructura del muñón															
No sostiene el rodamiento	A	Desgaste, deformación o fractura de la estructura del muñón	1	Sobrecarga de alimentación en el molino		Se debilita la estructura del muñón y capacidad de soporte del rodamiento, aumentando la holgura. Esto ocasiona ruidos anormales, vibraciones excesivas, fugas de pulpa a través de las fracturas, aumento de temperatura y desalineamiento con el rodamiento.	Corrosión en la superficie del muñón y rodamiento. Aumento del volumen de sólidos y bolas en el molino, incrementando el desgaste y riesgo de golpes en la carcasa, desgaste o rotura de bolas y desgaste de revestimientos y sus sujeciones, implicando pérdida de eficiencia y calidad del producto. Esto genera aumento de las vibraciones y el desalineamiento de los rodamientos, afectando además, a los engranajes, ejes y acoples, elevando sus temperaturas y activando las alarmas.	El derrame de carga compromete la seguridad del personal, de los rodamientos y sus soportes, aumentando su desgaste y temperaturas, conduciéndolos a falla catastrófica. Se detiene el molino para reparación y cambio de revestimientos, bolas, muñón, rodamientos y alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Fractura catastrófica del muñón, provocando soltura del cilindro y rodamientos, ocasionando una detención inmediata del molino y planta, siendo de grave riesgo al personal. Además, causaría daños extensos al sistema de transmisión y carcasa, conllevando una reparación costosa y prolongada, así como una pérdida significativa de producción.	2	4	14				
			2	Corrosión												
			3	Fatiga del material de la estructura												
			4	Desalineamiento con el cabezal												
			5	Abrasión debido al material o al efecto de Pulp Racing*												
			6	Impactos en la estructura del muñón												
Desalineamiento entre el muñón y rodamiento	B	Desalineamiento entre el muñón y rodamiento	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Fricción y desgaste entre las superficies de contacto del muñón y rodamiento, causando deformación e incremento de carga sobre el rodamiento, acelerando su desgaste, lo que provoca vibraciones, ruidos anormales en el molino y aumento de temperatura.	Aumenta el desgaste y deformación del muñón, provocando holgura con el rodamiento, lo que incrementa aún más la fricción y sobrecarga, causando desgaste prematuro en la superficie e interior del rodamiento, generando vibraciones excesivas y aumento de temperaturas, que se propagan hacia el cilindro del molino, engranajes, ejes y acoples, ocasionando la activación de las alarmas.	Se pierde eficiencia y calidad en la molienda, entregando un producto de mayor tamaño, afectando el estado de los componentes en el sector de descarga del molino. Se detiene el molino para reparación o cambio del muñón, rodamientos y alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Falla catastrófica del muñón y rodamiento, no pudiéndose sostener. Además del colapso de engranajes, ejes, acoples y carcasa, ocasionando una detención inmediata del molino y planta, siendo de grave riesgo al personal, implicando reparaciones costosas y prolongadas, así como en una pérdida significativa de producción.	4	5	24					
			2	Bastidores de los rodamientos sueltos												
			3	Vibraciones excesivas debido a desgaste de los revestimientos o desbalanceo del molino												
			4	Impactos en el molino												
			5	Desgaste o deformación en los rodamientos principales y muñones												

Figura 6.10: Diagrama FMECA del molino de bolas, parte 2. Elaboración propia.

4	Revestimiento o respaldo de goma	D	Proteger la estructura interna del molino contra el impacto y el desgaste, además de asentar los revestimientos de levante	1	No protege la estructura interna del molino	A	Desgaste, rotura, deformación o desprendimiento del respaldo de goma de la carcasa	1	Abrasión del respaldo causado por la fricción de alimentación	Exposición de la estructura interna de la carcasa a los impactos y abrasión, lo que genera desgaste, deformación o eventual fractura. Disminuye la capacidad de asentar los revestimientos, provocando que se suelten, afectando la eficiencia de molienda.	Desgaste desigual y aumento de soltura de revestimientos, lo que puede llevar a su caída, generando desequilibrio y desalineación en rodamientos y uniones, aumentando las vibraciones, provocando desgaste prematuro. Desalineamiento en engranajes, ejes y acoples, lo que eleva las temperaturas, activando las alarmas. Además, la carcasa puede filtrar pulpa a través de las fisuras provocando corrosión.	Desprendimiento de revestimientos y placas de la carcasa, que causa fugas de pulpa, reduce la eficiencia y calidad de molienda, representando un riesgo grave para el personal y la estructura del molino. Se detiene el molino para reparaciones y reemplazos, implicando pérdida de material, costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de la carcasa, rodamientos, engranajes, ejes y acoples, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves. También, se debilitan los cimientos, comprometiendo la estabilidad estructural. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	2	4	14																		
				2	No es capaz de asentar los revestimientos de levante			2	Fricción con los revestimientos de levante								3	Impactos de la carga	4	Rotura de uniones del respaldo	5	Sobrecarga de alimentación en el molino												
5	Revestimiento de carcasa y cabezales	E	Proteger el interior de la carcasa y cabezales del molino del impacto y desgaste, levantar la carga durante la molienda generando el efecto cascada y catarata, sostener las placas de la carcasa y cabezales en su lugar	1	No protege el interior de la carcasa y cabezales	A	Desgaste o fractura de los revestimientos de levante y de goma de la carcasa	1	Sobrecarga de alimentación en el molino								Estructura interna de cabezales y carcasa propensa a impactos y abrasión, generándose desgaste, deformación o fractura, provocando fugas de pulpa y soltura de los revestimientos de levante.	Corrosión en placas del cilindro, provocando pérdida de carga y desprendimiento de revestimientos, generando desbalanceo, disminución de eficiencia y calidad del producto, rotura de bolas, desgaste de las bombas del cajón, aumento de vibraciones en rodamientos, engranajes, ejes y acoples, causando desalineamiento y sobrecalentamiento, activando las alarmas.	El derrame de carga compromete gravemente la seguridad del personal y la zona de cimientos. Se detiene el molino para reparación y cambio de placas, revestimientos, bolas y alineamiento de componentes, implicando costos por mantenimiento, pérdidas de material y económicas por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos, piñón y corona, provocando la avería del motor por el desalineamiento, aumentando los riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones graves al personal. También, se debilitan los cimientos, comprometiendo la estabilidad estructural. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	4	21											
								2	Impactos a los revestimientos															3	Abrasión continua de la carga a los revestimientos	4	Fatiga de los revestimientos por carga cíclica	5	Bajo flujo de agua	6	Desalineamiento de los revestimientos			
								B	Revestimientos sueltos o caídos															1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Exposición abierta de la estructura interna de cabezales y carcasa frente a impactos y abrasión, generándose desgaste, deformación o fractura, provocando fugas de pulpa y soltura de las placas de las estructuras.	Corrosión en placas, debilitando el material hasta su desprendimiento. Esto genera pérdida de carga, provocando desbalanceo, disminución de eficiencia y calidad, rotura de bolas, desgaste de bombas del cajón, aumento de vibraciones en rodamientos, engranajes, ejes y acoples, causando desalineamiento y sobrecalentamiento, activando las alarmas.	Los derrames afectan gravemente la seguridad del personal y cimientos. Se detiene el molino para reparación y cambio de placas, revestimientos, bolas y alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y económica por inactividad.	Colapso catastrófico de rodamientos, revestimientos y transmisión, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	4	18		
										2	Impactos a los revestimientos	3	Fatiga de los revestimientos por vibraciones	4	Pernos sueltos o rotos																			
										A	Desgaste o fractura de los revestimientos de levante	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Disminución de la capacidad de levante, provocando distribución desigual del material dentro del molino, no generándose el efecto deseado, aumentando la fricción y desgaste de los revestimientos y medios de molienda.	Disminución de la eficiencia de molienda y calidad del producto. Atascos de material, produciéndose una distribución desigual de cargas y fuerzas, aumentando la tensión en la estructura del molino, generando deformaciones, fisuras o fracturas, presentando fugas de pulpa. Esto provoca desbalanceo y vibraciones excesivas en rodamientos, engranajes, ejes y acoples, causando desalineamiento y sobrecalentamiento, activando las alarmas.	Las fugas afectan levemente la seguridad del personal y la estructura por corrosión. Se detiene el molino para reparación y cambio de placas, revestimientos, bolas y el alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.								Colapso catastrófico de la carcasa, cabezales, rodamientos, revestimientos, engranajes, ejes y acoples, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4								4	21
												2	Impactos a los revestimientos																					
				B	Velocidad de rotación muy baja o muy alta (crítica)	1	Falla en el variador de frecuencia del motor	Disminución y sobre levantamiento de la carga, no generándose el efecto deseado. Aumenta la fricción entre el material, las bolas y los revestimientos, acelerando el desgaste.	Desequilibrio en la distribución de carga, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se genera desbalanceo, aumentando las vibraciones en rodamientos, engranajes, ejes, acoples y estructura, causando desalineamiento, sobrecalentamiento y aumento de tensiones, activando las alarmas.			Ruidos anormales y desgaste prematuro, implicando una detención del molino para reparación y cambio de revestimientos, bolas y el alineamiento de los componentes, provocando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de rodamientos, revestimientos, engranajes, estructura, ejes y acoples, aumentando los riesgos de fracturas, derrames de carga, incendios y lesiones graves. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.				3	3	13															
						2	Desgaste en el embrague de aire													3	Desgaste en los rodamientos principales	4	Lubricación insuficiente de los rodamientos			5	Vibraciones excesivas debido a desbalanceo del molino							
						A	Revestimientos de levante sueltos, rotos o caídos													1	Abrasión continua de la carga a los revestimientos	Disminución o nula capacidad de levante, provocando distribución desigual de cargas y fuerzas, aumentando la tensión en la estructura del molino, generando deformaciones, fisuras o fracturas, presentando fugas de pulpa y corrosión. Esto provoca desbalanceo y vibraciones excesivas en rodamientos, engranajes, ejes y acoples, causando desalineamiento y sobrecalentamiento, activando las alarmas.	Disminución de la eficiencia, capacidad de molienda y calidad del producto. Distribución desigual de cargas y fuerzas, aumentando la tensión en la estructura del molino, generando deformaciones, fisuras o fracturas, presentando fugas de pulpa y corrosión. Esto provoca desbalanceo y vibraciones excesivas en rodamientos, engranajes, ejes y acoples, causando desalineamiento y sobrecalentamiento, activando las alarmas.			Las fugas afectan levemente la seguridad del personal, pero gravemente la estructura por corrosión. Se detiene el molino para reparación y cambio de placas, revestimientos, bolas y el alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de rodamientos, engranajes, ejes, acoples y estructura, aumentando riesgos de incendio y lesiones graves al personal. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	4	18				
										2	Sobrecarga de alimentación en el molino			3	Impactos a los revestimientos	4				Fatiga de los revestimientos por vibraciones	5			Pernos sueltos o rotos										

Figura 6.11: Diagrama FMECA del molino de bolas, parte 3. Elaboración propia.

7	Corona	G	Transmitir la potencia mecánica desde el piñón hacia el tambor del molino mediante el engranaje helicoidal simple de sus dientes	1	No transmite potencia mecánica al tambor	B	Alta fricción entre dientes de contacto piñón - corona	1 Acumulación de partículas en la zona de contacto, provocando un desgaste acelerado y deformación en los dientes, que genera partículas metálicas finas que pueden contaminar el lubricante, resultando en aumento de vibraciones y disminución de la eficiencia de transmisión de potencia mecánica.	Incremento de temperatura en la zona de contacto, provocando un desgaste acelerado y deformación en los dientes, que genera partículas metálicas finas que pueden contaminar el lubricante, resultando en aumento de vibraciones y disminución de la eficiencia de transmisión de potencia mecánica.	Vibraciones excesivas y cargas adicionales que provocan desgaste prematuro en ejes principales, causando desalineamiento de los rodamientos, generando un desequilibrio y aumento de tensión de la estructura de la carcasa, ocasionando desgaste, deformación o fisuras en ella, lo que origina fugas de pulpa, corrosión y pérdida de soporte para la corona. Se elevan las temperaturas en rodamientos activando las alarmas. Disminuye la eficiencia y calidad del producto.	Las fugas afectan levemente la seguridad del personal, pero gravemente la estructura por corrosión. Se detiene el molino para reparación y cambio de la corona, piñón, placas, rodamientos, ejes y el alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de engranajes, rodamientos, ejes, acoples y estructura, sobrecalentando el motor, aumentando riesgos de incendios, daños eléctricos y lesiones graves al personal. Esto conllevaría una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	3	17									
							2 Lubricación de grasa insuficiente piñón - corona	2 Desgaste, deformación o fractura de los dientes o estructura de la corona	2 Desgaste, deformación o fractura de los dientes o estructura de la corona	2 Desgaste, deformación o fractura de los dientes o estructura de la corona	2 Desgaste, deformación o fractura de los dientes o estructura de la corona													
							3 Contaminación del lubricante	3 Impactos en la corona	3 Impactos en la corona	3 Impactos en la corona	3 Impactos en la corona													
							4 Desalineamiento de la corona con el piñón	4 Desbalanceo del molino	4 Desbalanceo del molino	4 Desbalanceo del molino	4 Desbalanceo del molino													
							5 Desgaste, deformación o fractura de los dientes de la corona																	
						C	Desalineamiento de la corona con el piñón	1 Sobre carga de alimentación en el molino	Aumento de fricción entre el piñón y la corona, elevando la temperatura en zona de contacto, resultando en desgaste prematuro de los dientes, deformación, contaminación del lubricante, aumentando ruidos y vibraciones, disminuyendo la eficiencia de transmisión.	Vibraciones y cargas excesivas que provocan desgaste prematuro en ejes, rodamientos del piñón y principales, causando desalineamiento de rodamientos y acoples, generando desequilibrio y aumento de tensión en la estructura de la carcasa, ocasionándole desgaste, deformación o fisuras, que origina fugas de pulpa y corrosión. Se elevan las temperaturas activando las alarmas. Pérdida de eficiencia de molienda y calidad del producto.	Las fugas afectan levemente la seguridad del personal, pero gravemente la estructura por corrosión. Se detiene el molino para reparación y cambio de la corona, piñón, placas, rodamientos, ejes y el alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de engranajes, rodamientos, ejes, acoples y estructura, sobrecalentando el motor, aumentando riesgos de incendios, daños eléctricos y lesiones graves al personal. Esto conllevaría una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	3	13									
							D	Fractura o deformación en la estructura de la carcasa	1 Sobre carga de alimentación en el molino	Desalineamiento de la corona con el piñón, soltura y pérdida de soporte para la corona, disminuyendo la eficiencia de transmisión de potencia, aumentando las vibraciones y ruidos.	Fricción entre los dientes de la corona y piñón, aumentando su temperatura, provocando desgaste y deformación. Fugas de pulpa en fracturas de la carcasa, que corroe su estructura y la de la corona, debilitando el soporte y desgastando la corona. Vibraciones excesivas que desgastan y desalinean los ejes, acoples y rodamientos, lo que eleva sus temperaturas y activa las alarmas. Disminución de la eficiencia de molienda y calidad del producto.	El derrame de carga compromete la seguridad del personal y la zona de cimientos. Se detiene la producción para reparación y cambio de la corona, piñón, rodamientos, placas y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico de la corona, piñón, rodamientos, ejes, acoples y estructura, sobrecalentando el motor, aumentando los riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones graves al personal. También, se debilitan los cimientos, comprometiendo la estabilidad estructural. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	2	4	14								
								E	Fractura o deformación en la estructura de la corona	2 Desalineamiento del cilindro con el eje del molino	Desalineamiento de la corona con el piñón y distribución desigual de la carga sobre los dientes, provocando desgaste prematuro de la corona y piñón, lo que resulta en una disminución de la transmisión de potencia al tambor	Vibraciones excesivas y cargas adicionales que provocan desgaste prematuro y desalineamiento en ejes, acoples, rodamientos del piñón y principales, generando desequilibrio y aumento de tensión en la estructura de la carcasa, ocasionándole desgaste, deformación o fisuras, que origina fugas de pulpa y corrosión. Se elevan las temperaturas activando las alarmas. Disminución de la eficiencia de molienda y calidad del producto.	Las fugas afectan levemente la seguridad del personal, pero gravemente la estructura por corrosión. Se detiene el molino para reparación y cambio de la corona, piñón, placas, rodamientos, ejes y el alineamiento de componentes, implicando costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de la corona, piñón, rodamientos, ejes, estructura y acoples, sobrecalentando el motor, aumentando los riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones graves al personal. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	2	3	9							
									A	Desgaste, deformación o fractura de dientes del piñón	3 Impactos en la corona	Impactos en la corona	Impactos en la corona	Impactos en la corona	Impactos en la corona	Impactos en la corona	Impactos en la corona	Impactos en la corona	Impactos en la corona	Impactos en la corona	Impactos en la corona	2	3	9
						A				Desgaste, deformación o fractura de dientes del piñón	4 Fatiga de la estructura de la corona	Fatiga de la estructura de la corona	Fatiga de la estructura de la corona	Fatiga de la estructura de la corona	Fatiga de la estructura de la corona	Fatiga de la estructura de la corona	Fatiga de la estructura de la corona	Fatiga de la estructura de la corona	Fatiga de la estructura de la corona	Fatiga de la estructura de la corona	Fatiga de la estructura de la corona	2	3	9
							A			Desgaste, deformación o fractura de dientes del piñón	5 Corrosión	Corrosión	Corrosión	Corrosión	Corrosión	Corrosión	Corrosión	Corrosión	Corrosión	Corrosión	Corrosión	2	3	9
								A		Desgaste, deformación o fractura de dientes del piñón	1 Sobre carga de alimentación en el molino	Disminución de la eficiencia de transmisión de la potencia mecánica a la corona	Disminución de la eficiencia de molienda y calidad del producto. Aumento de la carga sobre los rodamientos principales, acelerando su desgaste, provocando vibraciones excesivas en el molino, que elevan los esfuerzos en la estructura del cilindro. Esto provoca desalineamiento de los rodamientos principales y secundarios, aumentando sus temperaturas, lo que activa las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio del piñón, corona, rodamientos y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico del piñón, corona, rodamientos principales y secundarios, ejes y acoples, sobrecalentando el motor, aumentando riesgos de incendios, daños eléctricos y lesiones graves al personal. Esto conllevaría una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	3	17						
										A	Desgaste, deformación o fractura de dientes del piñón	2 Desalineamiento del piñón con la corona	Distribución desigual de carga sobre los dientes, provocando desgaste prematuro en el piñón y corona, aumentando la carga sobre sus rodamientos generando vibraciones altas, afectando los ejes y acoples.	Distribución desigual de carga sobre los dientes, provocando desgaste prematuro en el piñón y corona, aumentando la carga sobre sus rodamientos generando vibraciones altas, afectando los ejes y acoples.	Distribución desigual de carga sobre los dientes, provocando desgaste prematuro en el piñón y corona, aumentando la carga sobre sus rodamientos generando vibraciones altas, afectando los ejes y acoples.	Distribución desigual de carga sobre los dientes, provocando desgaste prematuro en el piñón y corona, aumentando la carga sobre sus rodamientos generando vibraciones altas, afectando los ejes y acoples.	Distribución desigual de carga sobre los dientes, provocando desgaste prematuro en el piñón y corona, aumentando la carga sobre sus rodamientos generando vibraciones altas, afectando los ejes y acoples.	Distribución desigual de carga sobre los dientes, provocando desgaste prematuro en el piñón y corona, aumentando la carga sobre sus rodamientos generando vibraciones altas, afectando los ejes y acoples.	Distribución desigual de carga sobre los dientes, provocando desgaste prematuro en el piñón y corona, aumentando la carga sobre sus rodamientos generando vibraciones altas, afectando los ejes y acoples.	Distribución desigual de carga sobre los dientes, provocando desgaste prematuro en el piñón y corona, aumentando la carga sobre sus rodamientos generando vibraciones altas, afectando los ejes y acoples.	Distribución desigual de carga sobre los dientes, provocando desgaste prematuro en el piñón y corona, aumentando la carga sobre sus rodamientos generando vibraciones altas, afectando los ejes y acoples.	Distribución desigual de carga sobre los dientes, provocando desgaste prematuro en el piñón y corona, aumentando la carga sobre sus rodamientos generando vibraciones altas, afectando los ejes y acoples.	4	3
									A		Desgaste, deformación o fractura de dientes del piñón	3 Lubricación de grasa insuficiente piñón - corona	Lubricación de grasa insuficiente sobre los dientes, provocando desgaste prematuro en el piñón y corona, aumentando la carga sobre sus rodamientos generando vibraciones altas, afectando los ejes y acoples.	Lubricación de grasa insuficiente sobre los dientes, provocando desgaste prematuro en el piñón y corona, aumentando la carga sobre sus rodamientos generando vibraciones altas, afectando los ejes y acoples.	Lubricación de grasa insuficiente sobre los dientes, provocando desgaste prematuro en el piñón y corona, aumentando la carga sobre sus rodamientos generando vibraciones altas, afectando los ejes y acoples.	Lubricación de grasa insuficiente sobre los dientes, provocando desgaste prematuro en el piñón y corona, aumentando la carga sobre sus rodamientos generando vibraciones altas, afectando los ejes y acoples.	Lubricación de grasa insuficiente sobre los dientes, provocando desgaste prematuro en el piñón y corona, aumentando la carga sobre sus rodamientos generando vibraciones altas, afectando los ejes y acoples.	Lubricación de grasa insuficiente sobre los dientes, provocando desgaste prematuro en el piñón y corona, aumentando la carga sobre sus rodamientos generando vibraciones altas, afectando los ejes y acoples.	Lubricación de grasa insuficiente sobre los dientes, provocando desgaste prematuro en el piñón y corona, aumentando la carga sobre sus rodamientos generando vibraciones altas, afectando los ejes y acoples.	Lubricación de grasa insuficiente sobre los dientes, provocando desgaste prematuro en el piñón y corona, aumentando la carga sobre sus rodamientos generando vibraciones altas, afectando los ejes y acoples.	Lubricación de grasa insuficiente sobre los dientes, provocando desgaste prematuro en el piñón y corona, aumentando la carga sobre sus rodamientos generando vibraciones altas, afectando los ejes y acoples.	Lubricación de grasa insuficiente sobre los dientes, provocando desgaste prematuro en el piñón y corona, aumentando la carga sobre sus rodamientos generando vibraciones altas, afectando los ejes y acoples.	4	3
						A					Desgaste, deformación o fractura de dientes del piñón	4 Fatiga del material del piñón por carga cíclica	Fatiga del material del piñón por carga cíclica	Fatiga del material del piñón por carga cíclica	Fatiga del material del piñón por carga cíclica	Fatiga del material del piñón por carga cíclica	Fatiga del material del piñón por carga cíclica	Fatiga del material del piñón por carga cíclica	Fatiga del material del piñón por carga cíclica	Fatiga del material del piñón por carga cíclica	Fatiga del material del piñón por carga cíclica	Fatiga del material del piñón por carga cíclica	4	3
							A				Desgaste, deformación o fractura de dientes del piñón	5 Contaminación del lubricante	Contaminación del lubricante	Contaminación del lubricante	Contaminación del lubricante	Contaminación del lubricante	Contaminación del lubricante	Contaminación del lubricante	Contaminación del lubricante	Contaminación del lubricante	Contaminación del lubricante	Contaminación del lubricante	4	3
								A			Desgaste, deformación o fractura de dientes del piñón	6 Impactos en el piñón por falla en la protección	Impactos en el piñón por falla en la protección	Impactos en el piñón por falla en la protección	Impactos en el piñón por falla en la protección	Impactos en el piñón por falla en la protección	Impactos en el piñón por falla en la protección	Impactos en el piñón por falla en la protección	Impactos en el piñón por falla en la protección	Impactos en el piñón por falla en la protección	Impactos en el piñón por falla en la protección	Impactos en el piñón por falla en la protección	4	3

Figura 6.13: Diagrama FMECA del molino de bolas, parte 5. Elaboración propia.

II	8	Piñón	H	Transmitir la potencia mecánica proveniente del motor principal hacia la corona	1	No transmite potencia mecánica a la corona	B	Alta fricción entre dientes de contacto piñón - corona	1 Acumulación de partículas en el piñón	Incremento de temperatura en la zona de contacto, provocando un desgaste acelerado y deformación en los dientes, lo que genera partículas metálicas finas que pueden contaminar el lubricante, resultando en aumento de vibraciones y disminución de la eficiencia de transmisión de potencia mecánica.	Vibraciones excesivas y cargas adicionales que provocan desgaste prematuro en ejes, rodamientos del piñón y principales, causando desalineamiento de los rodamientos, generando un desequilibrio y aumento de tensión de la estructura de la carcasa, ocasionando desgaste, deformación o fisuras en ella, lo que origina fugas de pulpa, corrosión y pérdida de soporte para la corona. Se elevan las temperaturas en rodamientos activando las alarmas. Disminuye la eficiencia y calidad del producto.	Las fugas afectan levemente la seguridad del personal, pero gravemente la estructura por corrosión. Se detiene el molino para reparación y cambio del piñón, corona, placas, rodamientos, ejes y el alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de engranajes, rodamientos, ejes, acoples y estructura, sobrecalentando el motor, aumentando riesgos de incendios, daños eléctricos y lesiones graves al personal. Esto conllevaría una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	3	17
								2 Lubricación de grasa insuficiente piñón - corona								
								3 Contaminación del lubricante								
								4 Desalineamiento del piñón con la corona								
								5 Desgaste, deformación o fractura de los dientes del piñón								
							C	Desalineamiento de la corona con el piñón	1 Sobrecarga de alimentación en el molino	Aumento de fricción entre el piñón y la corona, elevando la temperatura en zona de contacto, resultando en desgaste prematuro de los dientes y deformación, contaminando el lubricante, aumentando ruidos y vibraciones, disminuyendo la eficiencia de transmisión.	Vibraciones y cargas excesivas que provocan desgaste prematuro en ejes, rodamientos del piñón y principales, causando desalineamiento de rodamientos y acoples, generando desequilibrio y aumento de tensión en la estructura de la carcasa, ocasionándole desgaste, deformación o fisuras, que origina fugas de pulpa y corrosión. Se elevan las temperaturas activando las alarmas. Pérdida de eficiencia de molienda y calidad del producto.	Las fugas afectan levemente la seguridad del personal, pero gravemente la estructura por corrosión. Se detiene el molino para reparación y cambio del piñón, corona, placas, rodamientos, ejes y el alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de engranajes, rodamientos, ejes, acoples y estructura, sobrecalentando el motor, aumentando riesgos de incendios, daños eléctricos y lesiones graves al personal. Esto conllevaría una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	3	13
	2 Desgaste, deformación o fractura de los dientes o estructura de la corona															
	3 Impactos en la corona															
	4 Desbalanceo del molino															
	D	Desgaste en rodamientos del eje del piñón	1 Desalineamiento entre el eje y rodamientos	Fricción entre las superficies de contacto del rodamiento, generando calor, vibraciones y ruidos anormales, aumentando la temperatura en el eje, disminuyendo la capacidad de soportar cargas y transmitir energía.	Vibraciones excesivas que provocan desgaste prematuro, deformación, desalineamiento y fractura en acoples, ejes, engranajes, rodamientos del piñón y principales, aumentando el consumo de energía, implicando altos costos operativos y elevando las temperaturas hasta activar las alarmas. Disminución de la eficiencia de molienda y calidad del producto.	Se detiene el molino para reparación y cambio de los rodamientos, piñón, corona y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos, engranajes, ejes y acoples, aumentando los riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantención.	3	2	8						
	2 Lubricación insuficiente en rodamientos															
	3 Sobrecarga de alimentación en el molino															
4 Ingreso de partículas contaminantes al rodamiento																
9	Accionamiento	Rodamientos del piñón	I	Brindar soporte y permitir la rotación suave del eje del piñón, manejando cargas radiales y axiales	1	No soporta el eje del piñón	A	Desgaste, deformación o fractura en rodamientos	1 Fricción entre componentes internos del rodamiento	Fricción del rodamiento con el eje, provocando desgaste en las zonas de contacto, produciendo calor lo que genera holgura, disminuyendo total o parcialmente la capacidad del rodamiento de soportar el eje.	Vibraciones excesivas y cargas adicionales que provocan el desalineamiento y deformación en acoples de unión al motor, de ejes y dientes de los engranajes. Disminuye la eficiencia de transmisión de la potencia, por ende, se reduce la capacidad, eficiencia de molienda y la calidad del producto. Esto genera desequilibrio y aumento de tensión en la estructura del molino, ocasionando desgaste, deformación o fisuras, que origina fugas de pulpa y corrosión. En conjunto, se elevan las temperaturas y vibraciones, activando las alarmas.	Las fugas de pulpa y lubricante afectan levemente la seguridad del personal, pero aumentan los riesgos de incendio y afectan gravemente la estructura por corrosión. Se detiene el molino para reparación y cambio de los rodamientos, piñón, corona, placas, ejes, acoples y el alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos del piñón y principales, engranajes, ejes, motor y acoples, con altos riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantención.	3	3	13
2 Desalineamiento entre el eje y rodamientos																
3 Desalineamiento entre componentes internos del rodamiento																
4 Lubricación insuficiente en rodamientos																
5 Sobrecarga de alimentación en el molino																
6 Ingreso de partículas contaminantes al rodamiento																
7 Fatiga del material del rodamiento por carga cíclica																
8 Impactos en rodamientos o eje																
2	No hay movimiento rotacional suave	A	Desgaste o deformación en rodamientos	1 Fricción entre componentes internos del rodamiento	Disminuye la capacidad rotacional del rodamiento debido a la alta fricción, reduciendo la eficiencia de transmisión de potencia hacia los engranajes. Aumento de temperatura en los rodamientos y ejes, provocando deformación e incremento de las vibraciones, ocasionando desalineamiento de los rodamientos, en acoples de los ejes con el motor y entre los engranajes.	Desgaste prematuro, deformación o fractura en los dientes de los engranajes, acoples y ejes, debido al aumento de la fricción por el desalineamiento. Se producen vibraciones excesivas y cargas adicionales que afectan la transmisión hacia el motor, los rodamientos mismos del piñón y los principales, provocando sobrecalentamiento y desalineamiento, lo que activa las alarmas de temperatura y posición. Se pueden presentar fugas de lubricante en los rodamientos si el daño se extiende y se forman fisuras. Disminuye la eficiencia de molienda y calidad del producto.	Las fugas de lubricante afectan levemente la seguridad del personal, aunque aumentan los riesgos de incendio. Se detiene el molino para reparación y cambio de los rodamientos del piñón y principales, personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantención.	3	2	8						
2 Desalineamiento entre el eje y rodamientos																
3 Desalineamiento entre componentes internos del rodamiento																
4 Lubricación insuficiente en rodamientos																
5 Sobrecarga de alimentación en el molino																
6 Ingreso de partículas contaminantes al rodamiento																
7 Fatiga del material del rodamiento por carga cíclica																
8 Impactos en rodamientos o eje																

Figura 6.14: Diagrama FMECA del molino de bolas, parte 6. Elaboración propia.

Molino de bolas	11	Rodamientos principales	K	Otorgar soporte y permitir la rotación del tambor del molino, conectándose a través de los muñones	B	Desalineamiento de los rodamientos con el eje del molino	1	Desgaste o deformación en los rodamientos principales y muñones	Fricción y distribución desigual de la carga, resultando en desgaste prematuro e irregular, deformación o fractura en componentes de los rodamientos y en los muñones, presentando vibraciones, aumento de temperatura, ruidos anormales y fugas leves de lubricante, disminuyendo la estabilidad y capacidad de soporte.	Vibraciones excesivas y cargas adicionales que provocan desgaste prematuro y deformación en engranajes, acoples, ejes y rodamientos secundarios. Disminuye la eficiencia de transmisión, requiriendo mayor esfuerzo del motor, aumentando el consumo energético, reduciendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Esto genera desequilibrio, aumentando el desgaste de los revestimientos e incrementando la tensión en la estructura del molino, causando desgaste, deformación o fisuras, que origina fugas de pulpa y corrosión. En conjunto, se elevan las temperaturas y vibraciones, activando las alarmas.	Las fugas de pulpa afectan levemente la seguridad del personal y la zona afectada. Se detiene el molino para reparación y cambio de rodamientos principales y secundarios, engranajes, ejes, acoples, motor y alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos principales, del piñón y motor, engranajes, ejes, motor y acoples, desplomándose el molino, resultando en altos riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones muy graves o fatales al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	4	21
							2	Impactos en el molino							
							3	Vibraciones excesivas debido a desgaste de los revestimientos o desbalanceo del molino							
							4	Sobrecarga de alimentación en el molino							
							5	Bastidores de los rodamientos sueltos							
					A	Desgaste, deformación o fractura en rodamientos	1	Fricción entre componentes internos del rodamiento	Fricción que disminuye la capacidad rotacional de los engranajes, acoples, embrague, ejes, rodamientos, produciendo partículas que contaminan el lubricante, aumentando la temperatura en los rodamientos y muñones, provocando deformación e incremento de ruidos anormales y vibraciones, ocasionando desalineamiento o soltura de los rodamientos con el bastidor.	Vibraciones excesivas y cargas adicionales que provocan el desalineamiento, deformación y desgaste prematuro en los engranajes, acoples, embrague, ejes, rodamientos del motor y piñón. Disminuye la eficiencia de transmisión de la potencia, por ende, se reduce la capacidad, eficiencia de molienda y la calidad del producto. Esto genera desequilibrio, aumentando el desgaste de los revestimientos e incrementando la tensión en la estructura del molino, causando desgaste, deformación o fisuras, que origina fugas de pulpa y corrosión. En conjunto, se elevan las temperaturas y vibraciones, activando las alarmas.	Las fugas de pulpa y lubricante afectan levemente la seguridad del personal, pero aumentan los riesgos de incendio y afectan gravemente la estructura por corrosión a largo plazo. Se detiene el molino para reparación y cambio de los rodamientos, piñón, corona, placas, ejes, acoples, revestimientos y el alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos principales, del piñón y motor, engranajes, ejes, motor, revestimientos o acoples, con altos riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	4	21
							2	Desalineamiento entre el eje del molino y rodamientos							
							3	Desalineamiento entre componentes internos del rodamiento							
							4	Lubricación insuficiente en rodamientos							
							5	Sobrecarga de alimentación en el molino							
							6	Ingreso de partículas contaminantes al rodamiento							
							7	Fatiga del material del rodamiento por carga cíclica							
8	Impactos en rodamientos o molino														
B	Lubricación insuficiente en rodamientos	1	Bajo nivel de grasa	Desgaste prematuro en rodillos y pistas de rodadura, resultando en deformación de estas superficies, distribuyendo de forma desigual la carga en rodillos y pista, aumentando la fricción y temperatura, generando partículas de acero que aumentan el daño.	Vibraciones y cargas excesivas que provocan grietas en rodamientos, desalineación interna y con el muñón, desgaste, desalineación y deformación en engranajes, ejes, rodamientos secundarios y acoples. Disminuye eficiencia de molienda y calidad del producto. Aumenta el desgaste en revestimientos y tensión en estructura, causando deformación o fisuras, fugas y corrosión. En conjunto, se elevan las temperaturas y vibraciones, activando las alarmas.	Las fugas de pulpa afectan levemente la seguridad del personal y la zona. Se detiene el molino para reparación y cambio de rodamientos principales y secundarios, engranajes, ejes, acoples, placas, revestimientos y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos principales, del piñón y motor, engranajes, ejes, motor, revestimientos o acoples, con altos riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	5	4	23					
		2	Contaminación del lubricante												
		3	Sobrecalentamiento de los rodamientos												
		4	Obstrucción en los conductos de lubricación												
		5	Desgaste en bombas de lubricación												
C	Desalineamiento entre pistas de rodadura y los elementos rodantes	1	Cargas desiguales o sobrecarga de alimentación	Fricción y distribución desigual de la carga, resultando en desgaste prematuro e irregular, deformación o fractura en pistas de rodadura, rodillos, sellos y juntas, aumentando la holgura entre los componentes, presentando vibraciones, aumento de temperatura, ruidos anormales y fugas leves de lubricante, que disminuye la capacidad rotacional.	Vibraciones y cargas excesivas que provocan desalineamiento, deformación y desgaste prematuro en engranajes, acoples, ejes y rodamientos secundarios. Disminuye la eficiencia de transmisión, requiriendo mayor esfuerzo del motor y consumo energético, reduciendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Aumenta el desgaste de revestimientos y tensión estructural, causando desgaste, deformación o fisuras, que origina fugas y corrosión. En conjunto, se elevan las temperaturas y vibraciones, activando las alarmas.	Las fugas de pulpa y lubricante afectan levemente la seguridad del personal, aumentan los riesgos de incendio y la estructura por corrosión. Se detiene el molino para reparación y cambio de rodamientos, engranajes, placas, acoples, revestimientos, ejes y alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos principales, del piñón y motor, engranajes, ejes, motor, revestimientos o acoples, con altos riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	3	13					
		2	Desgaste, deformación o fractura en rodamientos												
		3	Flexión o deformación en los muñones o cilindro por sobrecarga												
		4	Vibraciones excesivas												
		5	Desalineamiento entre el eje del molino y rodamientos												
1	No soporta al rodamiento	A	Desgaste, deformación o fractura del soporte de alojamiento del rodamiento	1	Desalineamiento del molino y con los rodamientos	Holgura entre el rodamiento y el bastidor, disminuyendo la capacidad de soporte, lo que aumenta las vibraciones, fricción y carga desigual en rodamiento, acelerando el desgaste de las superficies en contacto, provocando desalineamiento de los rodamientos. Aumenta el consumo interno del rodamiento y con el bastidor.	Vibraciones excesivas y cargas desiguales que provocan desgaste, fatiga, deformación, fractura o desalineamiento de las pistas de rodaduras con los rodillos y del rodamiento con el muñón, presentando fugas de lubricante, lo que aumenta la generación de calor, activando las alarmas de seguridad, aumentando el consumo energético, disminuye la eficiencia de molienda y calidad del producto.	Las fugas de lubricante afectan levemente la seguridad del personal, aumentando riesgos de incendio. Se detiene el molino para reparación y cambio de rodamientos, bastidores y muñones, implicando costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	2	5	19				
				2	Fatiga del material por carga cíclica										
				3	Sobrecarga de alimentación del molino										
				4	Impactos en el molino										
				5	Corrosión										

Figura 6.16: Diagrama FMECA del molino de bolas, parte 8. Elaboración propia.

12	Bastidores de rodamientos principales	L	Proveer soporte y posicionar los rodamientos, limitando el movimiento radial y axial	2	No mantiene la posición establecida	A	Pernos de sujeción de los bastidores rotos o sueltos	1	Tensión aplicada insuficiente	Desplazamiento gradual de la estructura, no manteniendo la posición establecida, lo que aumenta las vibraciones del molino, provoca cargas desiguales en el bastidor que causan fractura, afectando el soporte del rodamiento, que ocasiona holgura y disminuye la capacidad de soporte.	Vibraciones excesivas y cargas desiguales que provocan desbalanceo del molino, aumentando el desgaste de las bolas y revestimientos, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se genera desgaste, fatiga, deformación, fractura y desalineamiento en rodamientos, engranajes, ejes, motor y tensión en la estructura, presentando fugas de pulpa y lubricante, lo que aumenta la generación de calor, activando las alarmas.	Las fugas de pulpa y lubricante afectan levemente la seguridad del personal, aumentan los riesgos de incendio y corrosión estructural. Se detiene el molino para reparación y cambio de bastidores, rodamientos, engranajes, placas, revestimientos, ejes y el alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de los bastidores, rodamientos principales, ejes, motor, revestimientos y engranajes, desplomándose el molino, resultando en daños eléctricos y lesiones muy graves o fatales al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantención.	4	4	21
								2	Vibraciones excesivas							
								3	Desgaste o deformación de los pernos							
								4	Corrosión							
								5	Distribución de carga irregular en los pernos por desalineamiento o desbalanceo del molino							
						B	Desalineamiento del bastidor con el rodamiento o con el eje del molino	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Fricción y distribución desigual de la carga, resultando en desgaste, deformación o fractura en las superficies del bastidor, rodamientos y muñones, presentando vibraciones, aumento de temperatura, ruidos anormales y fugas de lubricante, disminuyendo la estabilidad, no manteniendo la posición establecida.	Vibraciones excesivas y cargas desiguales que provocan desgaste, fatiga, deformación, fractura y desalineamiento en rodamientos, engranajes, ejes, motor y tensión en la estructura, presentando fugas de pulpa y lubricante, lo que aumenta la generación de calor, activando las alarmas. Se genera desbalanceo del molino, incrementando el desgaste de bolas y revestimientos, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto.	Fugas de pulpa y lubricante afectan levemente la seguridad del personal, aumentan los riesgos de incendio y corrosión estructural. Se detiene el molino para reparación y cambio de bastidores, rodamientos, engranajes, placas, revestimientos, ejes, motor y el alineamiento de componentes, implicando pérdidas de material, costos de mantención y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de los bastidores, rodamientos principales, ejes, motor, revestimientos y engranajes, desplomándose el molino, resultando en daños eléctricos y lesiones muy graves o fatales al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantención	4	5	24
								2	Desgaste o deformación del rodamiento o del eje del molino							
								3	Impactos en el molino							
								4	Vibraciones excesivas							
								5	Lubricación insuficiente de los rodamientos							
13	Motor de accionamiento auxiliar	M	Transformar energía hidráulica en energía mecánica rotatoria para transmitirla al reductor auxiliar	1	No transforma la energía o entrega menor potencia	A	Baja presión hidráulica	1	Obstrucción en los conductos del sistema hidráulico	Funcionamiento ineficiente o irregular del motor, que provoca disminución de la potencia de salida, fluctuaciones en la velocidad de giro y en la carga del motor, aumentando la temperatura interna del equipo, lo que causa desgaste en el rotor, cilindro y juntas.	Aumento de carga en el reductor auxiliar, causando desgaste, deformación o fractura en los dientes de sus engranajes, en los ejes y acoples del sistema de accionamiento, resultando en un arranque brusco del molino, impactos y aumento del estrés en el piñón, corona y rodamientos. Vibraciones excesivas y cargas adicionales en rodamientos del piñón y principales, elevando sus temperaturas y activando las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio del motor hidráulico, reductor, piñón, corona y rodamientos principales y secundarios, implicando pérdidas por inactividad y costos de mantención.	Colapso catastrófico del motor y reductor auxiliar, engranajes y rodamientos, resultando en riesgo de incendio, daños eléctricos y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantención.	3	2	8
								2	Mangueras desgastadas, sueltas o con fisuras							
								3	Desgaste u obstrucción en el filtro de aceite							
								4	Bajo nivel de aceite							
								5	Desgaste o daño en la bomba hidráulica							
						B	Bajo nivel de aceite del sistema hidráulico	1	Mangueras desgastadas, sueltas o con fisuras	Disminución de lubricación interna, aumentando la carga y fricción, provocando desgaste en el cilindro, juntas, rotor y sellos, generando fugas de aceite, elevando temperatura del motor y disminuyendo la velocidad de giro.	Disminuye eficiencia de transmisión al reductor auxiliar, provocando aumento de carga, ocasionando desgaste, deformación o fractura en engranajes, resultando en arranque brusco del molino, impactos, aumento de estrés en piñón, corona y rodamientos. Cargas y vibraciones excesivas en rodamientos, elevando sus temperaturas, activando las alarmas.	Fugas de aceite afectan levemente la seguridad del personal, pero aumentan riesgos de incendio. Se detiene el molino para mantención del motor, reductor, engranajes y rodamientos, implicando pérdidas por inactividad y costos de mantención.	Colapso catastrófico del motor y reductor auxiliar, engranajes y rodamientos, resultando en riesgo de incendio, daños eléctricos y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantención.	3	2	8
								2	Falla interruptor de nivel de aceite del tanque							
								3	Sobrecalentamiento del motor hidráulico							
								4	Obstrucción en los conductos del sistema hidráulico							
						C	Obstrucción en el motor	1	Contaminación del aceite	Disminución del flujo hidráulico lo que reduce la eficiencia y potencia transmitida, aumenta la presión interna, provocando sobrecarga en los componentes del motor.	Desgaste, deformación o fractura en componentes del motor, disminuyendo la velocidad de giro, que aumenta la carga en reductor, dañando los engranajes, resultando en vibraciones y cargas excesivas en rodamientos, elevando sus temperaturas, activando las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio del motor, reductor, engranajes y rodamientos, implicando pérdidas por inactividad y costos de mantención.	Colapso catastrófico del motor, reductor, engranajes y rodamientos, con riesgo de incendio, daños eléctricos y lesiones graves al personal, prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantención.	1	4	10
2	Desgaste o daño de los componentes internos del motor															
3	Desgaste u obstrucción en el filtro de aceite															
D	Desgaste en componentes internos del motor	1	Sobrecarga de alimentación del molino	Distribución del fluido, carga y presión desigual en el motor, reduciendo la eficiencia y potencia transmitida, disminuyendo la velocidad y control de giro del motor, presentando fugas de aceite, disminuyendo la lubricación.	Sobrecalentamiento del motor. Aumento de carga en reductor, causando desgaste, fractura o deformación en engranajes, ejes y acoples, resultando en arranque brusco del molino, impactos y aumento de estrés en piñón, corona y rodamientos. Vibraciones y cargas excesivas en rodamientos, elevando sus temperaturas, activando las alarmas.	Fugas de aceite afectan levemente la seguridad del personal, pero aumentan riesgos de incendio. Se detiene el molino para mantención del motor, reductor, engranajes y rodamientos, implicando pérdidas por inactividad y costos de mantención.	Colapso catastrófico del motor y reductor auxiliar, engranajes y rodamientos, resultando en riesgo de incendio, daños eléctricos y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantención.	3	2	8						
		2	Fricción o abrasión de los componentes internos													
		3	Contaminación del aceite													
		4	Sobrecalentamiento del motor hidráulico													

Figura 6.17: Diagrama FMECA del molino de bolas, parte 9. Elaboración propia.

III	Avance lento	E	Desgaste en sellos del motor	1	Presión hidráulica demasiado alta	Incapacidad de contener el fluido dentro del sistema, presentando fugas, disminuyendo la presión	Aumento de la carga en el reductor, causando desgaste, fractura o deformación en engranajes, ejes y acoples, resultando en arranque brusco del molino, impactos y aumento del estrés en el piñón, corona y rodamientos. Vibraciones y cargas excesivas en rodamientos del piñón y principales, elevando sus temperaturas, activando las alarmas.	Las fugas de aceite afectan levemente la seguridad del personal, pero aumentan riesgos de incendio. Se detiene el molino para reparación y cambio del motor, reductor, engranajes, ejes, acoples y rodamientos, implicando pérdidas por inactividad y costos de mantenimiento.	Colapso catastrófico del motor y reductor auxiliar, engranajes, ejes, acoples y rodamientos, resultando en riesgo de incendio, daños eléctricos y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	2	8
				2	Fricción o abrasión de los sellos por el fluido							
				3	Temperaturas extremas							
				4	Fatiga por carga cíclica							
				5	Contaminación del aceite							
		F	Desgaste o desalineamiento del enganche con el eje del reductor	1	Fricción entre el enganche y el eje del piñón	Conexión inestable y disminución de la eficiencia de transmisión de potencia, aumentando la fricción en el enganche que eleva su temperatura, provocando deformación en los ejes, incrementando las vibraciones y ruidos anormales.	Desgaste acelerado del motor y reductor, provocando fluctuaciones en la velocidad de giro y carga para compensar la potencia. Desalineamiento con el enganche al eje del piñón, aumentando las vibraciones, causando deformación, lo que aumenta el desgaste en los rodamientos, elevando su temperatura y activando las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio de acoples, motor, reductor, ejes y rodamientos, implicando pérdidas por inactividad y costos de mantenimiento.	Colapso catastrófico de los acoples, motor, reductor y ejes, con riesgo de incendio por fugas de aceite, daños eléctricos y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	1	2	3
				2	Sobrecarga de alimentación del molino							
				3	Lubricación insuficiente del enganche							
				4	Vibraciones excesivas							
				5	Impactos en el motor, eje o enganche							
	A	Desalineamiento de los engranajes	1	Desgaste, deformación o fractura de los dientes de los engranajes	Aumento de fricción y carga desigual, lo que provoca desgaste irregular en los dientes de los engranajes, elevando la temperatura, generando deformación, fracturas de dientes y holgura entre los engranajes, reduciendo la eficiencia de funcionamiento, aumentando las vibraciones y el ruido.	Desgaste prematuro en rodamientos y deformación en ejes del accionamiento auxiliar, produciéndose pérdida del control de la velocidad de giro del molino, ocasionando arranques bruscos o paradas repentinas, provocando sobrecarga en el motor auxiliar, impactos en el molino, desgaste de los revestimientos y tensión estructural, afectando los rodamientos principales y secundarios, incrementando su temperatura hasta activar las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio en el reductor, motor, ejes, acoples, revestimientos, estructura del molino y rodamientos, implicando pérdidas por inactividad y costos de mantenimiento.	Colapso catastrófico del reductor, motor, ejes, acoples y rodamientos con riesgo de incendio, daños eléctricos y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	2	8	
			2	Impactos en el reductor								
			3	Sobrecarga de alimentación del molino								
			4	Vibraciones excesivas del molino								
			5	Desalineamiento del eje de transmisión								
	B	Desgaste, deformación o fractura de los dientes de los engranajes	1	Sobrecarga de alimentación del molino	Holgura entre los dientes de los engranajes, lo que reduce la eficiencia de funcionamiento del reductor, provocando pérdida del control de la velocidad de giro y torque del molino, ocasionando vibraciones y ruidos anormales.	Desgaste prematuro en rodamientos y deformación en ejes del accionamiento auxiliar, ocasionando arranques bruscos del molino, provocando sobrecarga en el motor auxiliar, impactos en el molino, desgaste de los revestimientos y tensión estructural, afectando los rodamientos principales y secundarios, incrementando su temperatura hasta activar las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio en el reductor, motor, ejes, acoples, revestimientos, estructura del molino y rodamientos, implicando pérdidas por inactividad y costos de mantenimiento.	Colapso catastrófico del reductor, motor, ejes, acoples y rodamientos, con riesgo de incendio, daños eléctricos y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	2	8	
			2	Desalineamiento de los engranajes								
			3	Lubricación insuficiente de los engranajes								
			4	Contaminación del lubricante								
			5	Fatiga en los engranajes por carga cíclica								
6			Impactos en el reductor									
C	Acoplamiento del giro lento desgastado o desalineado	1	Vibraciones excesivas en el sistema de transmisión	Fuerzas desiguales en el acople, provocando deformación en ejes, discos y desgaste en los rodamientos, reduciendo la capacidad de transmisión del torque y velocidad eficientemente, generando cargas adicionales en el reductor que producen desgaste prematuro en engranajes, causando vibraciones y ruidos anormales.	Se propaga el desalineamiento al eje del piñón, aumentando el desgaste en sus rodamientos, lo que provoca arranques bruscos del molino, generando sobrecarga en el motor auxiliar, impactos en el molino, desgaste de los revestimientos y tensión estructural, afectando los rodamientos principales, incrementando su temperatura hasta activar las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio de acoples, reductor, motor, ejes, revestimientos, estructura del molino y rodamientos, implicando pérdidas por inactividad y costos de mantenimiento.	Colapso catastrófico de los acoples, reductor, motor, ejes y rodamientos con riesgo de incendio, daños eléctricos y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	1	4		
		2	Desgaste desigual del acople									
		3	Sobrecarga de alimentación del molino									
		4	Impactos en el reductor									
		5	Fricción de los discos del acople									
		6	Desgaste o deformación en el eje del reductor y piñón									
A	Perforación, grieta o fractura de la estructura del piñón	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Fugas de material a través de las aberturas que provocan corrosión en la estructura y una alimentación irregular hacia el interior del molino, causando desequilibrio en la carga lo que aumenta las vibraciones provocando desalineamiento del piñón, exponiendo el sello de alimentación a abrasión y desgaste.	Dado el desequilibrio y pérdida de carga de alimentación, se produce un desgaste prematuro en los revestimientos y bolas de acero, aumenta la tensión estructural del molino, provocando vibraciones excesivas que afecta a los rodamientos principales y engranajes, incrementando su desgaste y fricción, lo que eleva sus temperaturas activando las alarmas. Disminución de la eficiencia de molienda y capacidad operativa del molino, resultando en una menor calidad del producto y menor producción.	Las fugas de material afectan gravemente la seguridad del personal y el área del derrame. Se detiene el molino para reparación y cambio del piñón, revestimientos, rodamientos y engranajes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico del piñón, sello de alimentación, revestimientos, engranajes, rodamientos y carcasa, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	2	4	14		
		2	Impactos en la estructura del piñón									
		3	Abrasión de la estructura interna debido al material									
		4	Fatiga del piñón por carga cíclica									
		5	Desgaste del revestimiento del piñón									
		6	Vibraciones excesivas									
		7	Corrosión									

Figura 6.18: Diagrama FMECA del molino de bolas, parte 10. Elaboración propia.

15	Conducto o pitón de alimentación	N	Facilitar el flujo de material hacia el interior del tambor del molino para su molienda	1	No fluye fácilmente el material hacia el interior del molino	B	Desgaste o rotura del sello de alimentación	1	Abrasión del sello debido al paso de material	Pérdida de la capacidad de contener el flujo de material, presentando fugas de material o ingreso de contaminantes al molino, provocando abrasión y desgaste en el pitón, disminuyendo la eficiencia de alimentación.	Desequilibrio en la distribución de carga en la alimentación, generando desbalanceo en el molino, que aumenta el desgaste en los revestimientos y bolas de acero, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se producen vibraciones excesivas, afectando la tensión estructural, los rodamientos y engranajes, incrementando su desgaste y el riesgo de desalineamiento, lo que eleva sus temperaturas activando las alarmas.	Las fugas de material afectan gravemente la seguridad del personal y el área del derrame. Se detiene el molino para reparación y cambio del sello, pitón, revestimientos, rodamientos y engranajes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico del sello, pitón, revestimientos, rodamientos, engranajes y carcasa, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	3	17
								2	Impactos en el sello							
								3	Desalineamiento del conducto con el sello y muñón							
								4	Sobrecarga de alimentación en el molino							
								5	Falta de limpieza o purga							
						C	Desalineamiento del pitón con el muñón	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Ajuste deficiente entre el ducto y el muñón, provocando fricción excesiva y cargas desiguales que aumentan la presión localizada, conduciendo a un desgaste prematuro o deformación en el pitón, muñón y sello de alimentación, presentando fugas de material y abrasión.	Desbalanceo en el molino, generando aumento del desgaste de los revestimientos y bolas, lo que produce vibraciones excesivas que se propagan a los rodamientos y engranajes, provocando fricción y desgaste, aumentando sus temperaturas hasta activar las alarmas, resultando en una disminución de la eficiencia de molienda y calidad del producto.	Fuga significativa de material que afecta gravemente la seguridad del personal y la zona afectada. Se detiene el molino para reparación y cambio del sello, pitón, muñón, revestimientos, rodamientos y engranajes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico del sello, pitón, revestimientos, rodamientos, engranajes y muñones, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	3	13
								2	Impactos en el conducto de alimentación							
								3	Desgaste del pitón o del muñón en la unión							
								4	Vibraciones excesivas debido a desgaste de los revestimientos o desbalanceo del molino							
								5	Pernos de sujeción de la unión sueltos o rotos							
								6	Desalineamiento del molino							
						D	Acumulación de material en el ducto	1	Sobrecarga o aumento del tamaño de carga de alimentación en el molino	Bloqueo gradual del flujo de alimentación, disminuyendo la capacidad de producción, aumentando la presión y carga interna, dañando el sello, muñón y el conducto de alimentación, provocando deformaciones, desgaste y desalineamiento, resultando en fugas de material.	Desbalanceo y vibraciones excesivas que aumentan el desgaste en rodamientos principales y revestimientos, e incrementan la carga en engranajes y motor, causando mayor consumo energético, desgaste en engranajes, reduciendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se genera fricción, elevando sus temperaturas, con sobrecalentamiento en el motor, lo que activa indicadores y alarmas.	Las fugas afectan gravemente la seguridad del personal y el área del derrame. Se detiene el molino para reparación y cambio del sello, pitón, muñones, rodamientos, engranajes, revestimientos y motor, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico del sello de alimentación, pitón, muñones, rodamientos, motor, revestimientos y engranajes, desplomándose el molino, con alto riesgo de incendio, daños eléctricos y lesiones graves o fatales al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	4	18
2	Desgaste, deformación o rotura del revestimiento del pitón															
3	Deformación de la estructura del pitón															
A	Desgaste, deformación o fractura en el soporte de unión con el conducto de alimentación	1	Corrosión	Desalineamiento o soltura del conducto de alimentación con el chute, provocando obstrucciones en el flujo de material que va desgastando, deformando o agrietando el ducto y sello, y fugas de material que desgasta la estructura, lo que compromete la capacidad del chute para sostener el pitón y va generando desgaste o deformación en el chute.	Desbalanceo y vibraciones excesivas en el molino que aumentan el desgaste en rodamientos principales y revestimientos, e incrementan la carga en engranajes y motor principal, causando mayor consumo energético, desgaste en rodamientos del pitón, motor y en dientes de engranajes, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se genera fricción en estos componentes, elevando sus temperaturas, con sobrecalentamiento en el motor, lo que activa los indicadores y alarmas.	Las fugas de material afectan gravemente la seguridad del personal y el área del derrame. Se detiene el molino para reparación y cambio del pitón, soporte de la junta, chute, revestimientos, sello, rodamientos, motor y engranajes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico del pitón, sello, chute, rodamientos, revestimientos, motor y engranajes, con alto riesgo de incendio, daños eléctricos y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	3	13						
		2	Desalineamiento del chute con el pitón													
		3	Sobrecarga de alimentación en el molino													
		4	Fatiga del material de la unión por carga cíclica													
		5	Impactos en el chute													
		6	Acumulación de polvo o partículas abrasivas en las uniones													
A	Desalineamiento del chute con el muñón	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Tensión en el conducto de alimentación, generando su deformación, desalineamiento o desgaste por fricción, provocando vibraciones y obstrucción de material en el ducto, causando agrietamiento, fugas de material y desgaste, deformación o fisuras en el chute, sello y muñón.	Alimentación irregular que provoca desbalanceo y vibraciones excesivas en el molino que aumentan el desgaste en rodamientos principales y revestimientos, e incrementan la carga en engranajes y motor principal, causando mayor consumo energético, desgaste en rodamientos de pitón, motor y en dientes de engranajes, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se genera fricción en estos componentes, elevando sus temperaturas, con sobrecalentamiento en el motor, lo que activa los indicadores y alarmas.	Las fugas de material afectan gravemente la seguridad del personal y el área del derrame. Se detiene el molino para reparación y cambio del pitón, chute, sello, revestimientos, rodamientos, motor y engranajes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico del pitón, sello, muñones, chute, rodamientos, revestimientos, motor y engranajes, desplomándose el molino, con alto riesgo de incendio, daños eléctricos y lesiones graves o fatales al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	3	13						
		2	Impactos en el chute de alimentación													
		3	Desgaste o deformación del chute y del muñón													
		4	Vibraciones excesivas debido a desgaste de los revestimientos o desbalanceo del molino													
		5	Deformación de los rieles de montaje													
		6	Fijación inestable de las ruedas del chute													

Figura 6.19: Diagrama FMECA del molino de bolas, parte 11. Elaboración propia.

IV	Alimentación y descarga																												
16	Chute de alimentación	O	Dirigir el flujo de 1530 ton/día de material hacia el interior del molino, soportando y posicionando el conducto de alimentación	3	No alimenta el molino con un flujo de 1530 t/d	B	Pernos de sujeción sueltos o rotos	1	Tensión aplicada insuficiente	Pitón suelto o desalineado, generando fricción con el muñón, aumentando el desgaste prematuro, deformación o fisuras del sello, pitón, chute y muñón, lo que provoca obstrucción de material en el ducto y fugas de material.	Desbalanceo y vibraciones excesivas que aumentan desgaste en rodamientos principales y revestimientos, la carga en engranajes y motor, causando mayor consumo energético, desgaste en rodamientos del piñón, motor y dientes de engranajes, disminuyendo eficiencia de molienda y calidad. Se genera fricción, elevando sus temperaturas, activando alarmas.	Las fugas afectan gravemente la seguridad y el área afectada. Se detiene el molino para mantenimiento del pitón, chute, sello, revestimientos, rodamientos, motor y engranajes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico del pitón, sello, muñones, chute, rodamientos, engranajes, revestimientos, y motor, desplomándose el molino, con alto riesgo de incendio, daños eléctricos y lesiones graves o fatales al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.						2	3	9								
								2	Vibraciones excesivas																				
								3	Consumo de deformación de los pernos																				
								4	Corrosión																				
						A	Perforación, grieta o fractura en la estructura del chute	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Fugas de material a través de las aberturas que provocan daños e interrupción en la movilidad del chute y una alimentación irregular hacia el interior del molino, causando desequilibrio en la carga lo que aumenta las vibraciones, ocasionando desalineamiento del pitón, lo que resulta en desgaste, deformación o fractura en el sello y el muñón.	Desbalanceo y vibraciones excesivas en el molino que aumentan el desgaste en rodamientos principales, revestimientos y bolas de acero, e incrementan la carga en engranajes y motor principal, causando mayor consumo energético, desgaste en rodamientos del piñón, motor y en dientes de engranajes, y tensión estructural, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se genera fricción en estos componentes, elevando sus temperaturas, con sobrecalentamiento en el motor, lo que activa los indicadores y alarmas.	Las fugas de material afectan gravemente la seguridad del personal y el área del derrame. Se detiene el molino para reparación y cambio del pitón, chute, sello, revestimientos, rodamientos, motor y engranajes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico del pitón, sello, muñones, chute, rodamientos, revestimientos, motor y engranajes, desplomándose el molino, con alto riesgo de incendio, daños eléctricos y lesiones graves o fatales al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.																
								2	Impactos de la carga en el chute																				
								3	Abrasión de la estructura interna debido al material																				
								4	Fatiga del material del chute por carga cíclica																				
								5	Vibraciones excesivas del molino o por desequilibrios en la carga																				
								6	Corrosión																				
								7	Desgaste del revestimiento del chute																				
						B	Desalineamiento del chute con el muñón	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Tensión en el conducto de alimentación, generando su deformación, desalineamiento o desgaste por fricción, provocando vibraciones y obstrucción de material en el ducto, causando agrietamiento, fugas de material y desgaste, deformación o fisuras en el chute, sello y muñón.	Alimentación irregular que provoca desbalanceo y vibraciones excesivas en el molino que aumentan el desgaste en rodamientos principales y revestimientos, e incrementan la carga en engranajes y motor principal, causando mayor consumo energético, desgaste en rodamientos del piñón, motor y en dientes de engranajes, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se genera fricción en estos componentes, elevando sus temperaturas, con sobrecalentamiento en el motor, lo que activa los indicadores y alarmas.	Las fugas de material afectan gravemente la seguridad del personal y el área del derrame. Se detiene el molino para reparación y cambio del pitón, chute, sello, revestimientos, rodamientos, motor y engranajes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico del pitón, sello, muñones, chute, rodamientos, revestimientos, motor y engranajes, desplomándose el molino, con alto riesgo de incendio, daños eléctricos y lesiones graves o fatales al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.																
								2	Impactos en el chute de alimentación																				
								3	Desgaste o deformación del chute y del muñón																				
								4	Vibraciones excesivas debido a desgaste de los revestimientos o desbalanceo del molino																				
								5	Deformación de los rieles de montaje																				
								6	Fijación inestable de las ruedas del chute																				
						C	Desgaste del sello de alimentación	1	Abrasión del sello debido al paso de material	Pérdida de la capacidad de contener el flujo, presentando fugas de material o ingreso de contaminantes al molino, provocando abrasión y desgaste en el pitón y muñón, desalineando el conducto, generando tensión en el chute, aumentando riesgo de deformación o agrietamiento.	Desequilibrio en la distribución de carga en la alimentación, generando desbalanceo en el molino, que aumenta el desgaste en los revestimientos y bolas de acero, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se producen vibraciones excesivas, afectando la tensión estructural, los rodamientos y engranajes, incrementando su desgaste y el riesgo de desalineamiento, lo que eleva sus temperaturas activando las alarmas.	Las fugas de material afectan gravemente la seguridad del personal y el área del derrame. Se detiene el molino para reparación y cambio del sello, pitón, revestimientos, rodamientos y engranajes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico del sello, pitón, revestimientos, rodamientos, engranajes y carcasa, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.																
2	Impactos en el sello																												
3	Desalineamiento del conducto con el sello y el muñón																												
4	Sobrecarga de alimentación en el molino																												
5	Falta de limpieza o purga																												
17	Revestimientos del muñón de alimentación	P	Proteger y proporcionar la superficie de montaje para los sellos de alimentación	1	No protege la estructura interna del muñón	A	Desgaste o fractura del revestimiento del muñón	1	Desalineamiento del muñón con el revestimiento	Pérdida de protección al muñón, permitiendo la infiltración de material abrasivo y humedad, provocándole desgaste prematuro y corrosión. Además, el daño en el revestimiento, compromete la capacidad de sostener el sello y mantener el sellado hermético, presentando fugas de material o ingreso de contaminantes.	Holgura entre el sello y el conducto de alimentación, presentando desalineamiento, provocando obstrucción de material, lo que causa desequilibrio del flujo de carga, aumentando las vibraciones, generando desalineamiento, aumento de tensión estructural y desgaste en muñón, revestimientos de levante, rodamientos y engranajes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Las fugas de material afectan gravemente la seguridad del personal y el área del derrame. Se detiene el molino para reparación y cambio del revestimiento del muñón, sello, rodamientos y engranajes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico del revestimiento del muñón, sello, muñón, revestimientos, rodamientos, y engranajes, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.																
								2	Abrasión o fricción continua de la carga en el revestimiento y con el muñón																				
								3	Impactos en el revestimiento																				
								4	Sobrecarga de alimentación en el molino																				
								5	Fatiga del revestimiento por carga cíclica																				
								6	Corrosión																				

Figura 6.20: Diagrama FMECA del molino de bolas, parte 12. Elaboración propia.

18	Sello de alimentación	Q	Mantener un ambiente sellado, evitando fugas de pulpa	1	No mantiene un ambiente sellado	A	Desgaste o rotura del sello	<ol style="list-style-type: none"> Desalineamiento del sello con el pitón y el muñón Abrasión del sello debido al paso de material Fricción con el muñón y pitón debido al movimiento rotativo del molino Falta de limpieza o purga Impactos en el sello Sobrecarga de alimentación en el molino 	Pérdida de la capacidad de contener el flujo de material y mantener el sello hermético, presentando fugas de material o ingreso de contaminantes al molino, provocando abrasión y desgaste en el pitón, disminuyendo la eficiencia de alimentación, generando desalineamiento y obstrucción en el ducto.	Desequilibrio en la distribución de carga en la alimentación, generando desbalanceo en el molino, que aumenta el desgaste en los revestimientos y bolas de acero, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se producen vibraciones excesivas, afectando la tensión estructural, los rodamientos y engranajes, incrementando su desgaste y el riesgo de desalineamiento, lo que eleva sus temperaturas activando las alarmas.	Las fugas de material afectan gravemente la seguridad del personal y el área del derrame. Se detiene el molino para reparación y cambio del sello, pitón, revestimientos, rodamientos y engranajes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico del sello, pitón, revestimientos, rodamientos, engranajes y carcasa, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	3	17				
19	Revestimiento del muñón de descarga	R	Proteger la superficie interior del muñón	1	No protege la estructura interna del muñón	A	Desgaste o fractura del revestimiento del muñón	<ol style="list-style-type: none"> Desalineamiento del muñón con el revestimiento Abrasión o fricción continua de la carga en el revestimiento Impactos en el revestimiento Sobrecarga de alimentación en el molino Fatiga del revestimiento por carga cíclica Corrosión 	Pérdida de protección al muñón, permitiendo la infiltración de pulpa en la superficie interior del muñón, provocándole desgaste prematuro y corrosión, lo que va debilitando su estructura, causando holgura con el anillo de retención, y liberando partículas que van contaminando el material, generando irregularidades en la superficie donde puede acumular material y ocasionar obstrucción.	Deformación o agrietamiento del muñón, generando tensiones en la estructura del molino, comprometiendo la capacidad de sostener el rodamiento y provocando una distribución desigual de la carga, aumentando el desgaste de los revestimientos y bolas, además de generar vibraciones excesivas que desgastan los rodamientos y engranajes, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad, incrementando la obstrucción en la descarga, reduciendo la producción, resultando en un mayor tamaño de material que aumenta el desgaste en el anillo y trommel. Se eleva la temperatura en rodamientos activando las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio del revestimiento del muñón, muñón, revestimientos de levante, rodamientos, anillo, trommel y engranajes, implicando costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico del revestimiento del muñón, muñón, revestimientos de levante, rodamientos, anillo, trommel y engranajes, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	3	13				
20	Anillo de retención de bolas	S	Favorecer el paso de la pulpa y retener las bolas de acero	1	No permite el paso de pulpa	A	Acumulación de material en el anillo	<ol style="list-style-type: none"> Sobrecarga de alimentación del molino o tamaño de material y bolas de molienda demasiado grandes Desgaste, deformación o desajuste del anillo Bajo flujo de agua Velocidad de rotación alta del molino 	Impedimento del paso libre de pulpa hacia la descarga, aumentando la presión en el anillo, lo que incrementa su desgaste y riesgo de posible deformación o fractura. Se eleva el nivel de material acumulado, permitiendo el paso de bolas y pulpa por el centro del anillo.	Sobrecarga en el molino, provocando desequilibrio, aumentando el desgaste de las bolas y revestimientos, causando vibraciones excesivas en rodamientos, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad, elevando su temperatura, activando las alarmas. Desgaste, fractura o deformación en la parrilla del trommel, descargando material de gran tamaño y bolas, impactando en el cajón, llegando incluso a falla catastrófica de las bombas.	Desbordamiento y sobrecalentamiento del molino, afectando gravemente la seguridad y causando mayor consumo energético. Detención por mantenimiento del anillo, trommel, revestimientos, rodamientos y bombas, implicando altos costos de mantenimiento y pérdida producción por inactividad.	Colapso catastrófico del anillo, trommel, bombas, revestimientos, motor por sobrecalentamiento y rodamientos, con altos riesgos de incendio y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	4	21				
								B	Desgaste o deformación del anillo	<ol style="list-style-type: none"> Sobrecarga de alimentación del molino o tamaño de material y bolas de molienda demasiado grandes Abrasión o fricción continua de la carga en el anillo Fatiga del anillo por cargas cíclicas Impactos en el anillo Desalineamiento del anillo con el trommel y la carcasa 	Se produce desalineamiento del anillo y deformación de las ranuras volviéndose demasiado estrechas, lo que provoca acumulación de material y bolas, impidiendo el flujo libre de pulpa a través del anillo, aumentando la presión, con ello, el desgaste del anillo y revestimiento del muñón.	Sobrecarga en el molino, provocando desequilibrio, aumentando el desgaste de bolas y revestimientos, causando vibraciones excesivas en rodamientos, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad, elevando su temperatura, activando las alarmas. Sube el nivel de material acumulado, permitiendo el paso de bolas y pulpa por el centro del anillo, ocasionando desgaste, deformación o fractura en el trommel, descargando material de gran tamaño y bolas, impactando en el cajón, llegando incluso a falla catastrófica de las bombas.	Desbordamiento y sobrecalentamiento del molino, afectando gravemente la seguridad y causando mayor consumo energético. Detención por mantenimiento del anillo, trommel, revestimientos, rodamientos y bombas, implicando altos costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico del anillo, trommel, bombas, revestimientos, motor por sobrecalentamiento y rodamientos, con altos riesgos de incendio y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	2	4	14		
										A	Desgaste, deformación o fractura del anillo	<ol style="list-style-type: none"> Sobrecarga de alimentación del molino Abrasión o fricción continua de la carga en el anillo Fatiga del anillo por cargas cíclicas Impactos en el anillo Desalineamiento del anillo con el trommel y la carcasa 	Aumento del tamaño de las ranuras, cambios de dimensiones y agujeros grandes en el anillo, perdiendo la capacidad de retener las bolas de molienda, acelerando el desgaste de bolas, revestimiento del muñón y causando impactos, deformación, desgaste o fractura en el trommel.	Se reduce sustancialmente la cantidad de bolas en el molino, provocando disminución significativa de la eficiencia de molienda y calidad, presentando bolas en el producto, impactando en el cajón, llegando incluso a fallas catastróficas de las bombas. Carga desigual en el molino, aumentando el desgaste de revestimientos, entregando producto de gran tamaño, aumentando las vibraciones y temperaturas en rodamientos, activando alarmas.	Desbordamiento y sobrecalentamiento del molino, afectando gravemente la seguridad y causando mayor consumo energético. Detención por mantenimiento del anillo, trommel, revestimientos, rodamientos y bombas, implicando altos costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico del anillo, trommel, bombas, revestimientos, motor por sobrecalentamiento y rodamientos, con altos riesgos de incendio y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	2	4	14
												<ol style="list-style-type: none"> Sobrecarga de alimentación del molino Abrasión o fricción continua de la carga en el anillo Fatiga del anillo por cargas cíclicas Impactos en el anillo Desalineamiento del anillo con el trommel y la carcasa 							
						<ol style="list-style-type: none"> Sobrecarga de alimentación del molino Abrasión o fricción continua de la carga en el anillo Fatiga del anillo por cargas cíclicas Impactos en el anillo Desalineamiento del anillo con el trommel y la carcasa 													
						<ol style="list-style-type: none"> Sobrecarga de alimentación del molino Abrasión o fricción continua de la carga en el anillo Fatiga del anillo por cargas cíclicas Impactos en el anillo Desalineamiento del anillo con el trommel y la carcasa 													

Figura 6.21: Diagrama FMECA del molino de bolas, parte 13. Elaboración propia.

21	Trommel	T	Clasificar el material molido reteniendo el material grueso y permitiendo el paso al material más fino a razón de P80 de 44 micrómetros en un flujo de 1530 ton/día	1 No permite el paso de material fino	A	Acumulación de material grueso o fino en la parrilla del trommel	1	Velocidad de rotación muy baja	Reducción de la apertura de la parrilla por la acumulación de material, impidiendo el libre paso de material fino, provocando desgaste o deformación debido a la carga adicional y fricción, generando tensión en el soporte del trommel, causando su desalineamiento.	Aumenta la carga circulante en el molino, disminuyendo la capacidad, eficiencia de molienda y calidad del producto, lo que genera un aumento del consumo de energía y posible sobrecarga del motor. Sobrecarga de material en el molino, provocando desgaste en los revestimientos y bolas, aumentando las vibraciones, afectando los rodamientos y engranajes, causándoles desgaste prematuro y desalineamiento, que activa las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio de revestimientos, rodamientos, trommel, engranajes, motor y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico de los revestimientos, rodamientos, motor por sobrecalentamiento, engranajes y trommel, con altos riesgos de incendio y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	2	12
							2	Desgaste, deformación o desajuste de la parrilla							
							3	Bajo flujo de agua							
							4	Alimentación desigual del trommel							
							5	Sobrecarga de alimentación del molino o tamaño de material y bolas de molienda demasiado grandes							
				2 No clasifica adecuadamente el material	B	Desgaste o deformación de los paneles de la parrilla	1	Abración severa de la carga en la parrilla	Alteración de las dimensiones de las aberturas de la parrilla, dificultando el libre paso del material fino, lo que genera acumulación de material, aumentando la carga en el trommel, causando tensión en el soporte, ocasionando su desalineamiento.	Aumenta la carga circulante en el molino, disminuyendo la capacidad, eficiencia de molienda y calidad del producto, lo que genera un aumento del consumo de energía y posible sobrecarga del motor. Sobrecarga de material en el molino, provocando desgaste en los revestimientos y bolas, aumentando las vibraciones, afectando los rodamientos y engranajes, causándoles desgaste prematuro y desalineamiento, que activa las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio de revestimientos, rodamientos, trommel, engranajes, motor y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico de los revestimientos, rodamientos, motor por sobrecalentamiento, engranajes y trommel, con altos riesgos de incendio y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	2	8
							2	Impactos en la parrilla							
							3	Sobrecarga de alimentación o tamaño de bolas de molienda demasiado grandes							
							4	Corrosión							
							5	Desalineamiento del trommel							
				3 No retiene el material grueso en la parrilla	A	Velocidad de rotación irregular del molino	1	Falla en el variador de frecuencia del motor	Aumenta o disminuye la velocidad de transporte del material dentro del trommel, produciendo una carga desequilibrada, dificultando la separación efectiva de los gruesos y finos, disminuyendo la eficiencia de clasificación y ocasionando desgaste en los paneles de la parrilla.	Aumenta la carga circulante en el molino, disminuyendo la capacidad, eficiencia de molienda y calidad del producto, lo que genera un aumento del consumo de energía y posible sobrecarga del motor. Sobrecarga de material en el molino, provocando desgaste en los revestimientos y bolas, aumentando las vibraciones, afectando los rodamientos y engranajes, causándoles desgaste prematuro y desalineamiento, que activa las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio de revestimientos, rodamientos, trommel, engranajes, motor y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico de los revestimientos, rodamientos, motor por sobrecalentamiento, engranajes y trommel, con altos riesgos de incendio y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	3	17
							2	Desgaste en el embrague de aire							
							3	Desgaste en los rodamientos principales							
4	Lubricación insuficiente de los rodamientos														
5	Vibraciones excesivas debido a desbalanceo del molino														
3 No retiene el material grueso en la parrilla	A	Desgaste, deformación, rotura o caída de parrilla	1	Abración severa de la carga en la parrilla	Disminuye la eficiencia de clasificación del trommel, aumentando la cantidad de material grueso en la descarga del molino que pasa hacia el cajón de molienda junto con el material fino. Se producen obstrucciones de material que entorpecen la clasificación	Aumenta la carga circulante en el molino, disminuyendo la capacidad, eficiencia de molienda y calidad del producto, lo que genera un aumento del consumo de energía y posible sobrecarga del motor. Sobrecarga de material en el molino, provocando desgaste en los revestimientos y bolas, aumentando las vibraciones, afectando los rodamientos y engranajes, causándoles desgaste prematuro y desalineamiento, que activa las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio de los paneles del trommel, revestimientos, rodamientos, engranajes, motor y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad	Colapso catastrófico del trommel, revestimientos, rodamientos, motor por sobrecalentamiento y engranajes, con altos riesgos de incendio y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	3	13				
			2	Impactos en la parrilla											
			3	Sobrecarga de alimentación o tamaño de bolas de molienda demasiado grandes											
			4	Corrosión											
			5	Desalineamiento del trommel											
			6	Vibraciones excesivas del molino											
			7	Desgaste de sujeciones											
3 Bajo nivel de grasa en el sistema	A	Bajo nivel de grasa en el sistema	1	Mangueras desgastadas, sueltas o con fisuras	Lubricación insuficiente en componentes del sistema como conductos de engrase, bombas y distribuidores, causando obstrucción parcial o total, generando fricción, llevando al desgaste, corrosión y sobrecalentamiento.	Disminución de la viscosidad de la grasa, aumentando la fricción en superficies en contacto: rodillos, pistas y jaula, produciendo calor, causando desgaste, deformación, grietas, surcos, vibraciones y ruidos excesivos, resultando en desgaste acelerado y desplazamiento o desalineamiento del rodamiento, activando las alarmas. Desgaste de revestimientos y bolas.	Las fugas afectan levemente la seguridad del personal, pero aumentan los riesgos de incendio. Disminuye la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se detiene el molino para reparación y cambio del sistema de lubricación, rodamientos y revestimientos, implicando costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico de rodamientos, sistema de engrase, bastidores y muñones, comprometiendo la estabilidad y soporte del molino, provocando altos riesgos de incendio y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	4	21				
			2	Falla interruptor de nivel de grasa del tanque											
			3	Obstrucción en los conductos del sistema											
			4	Contaminación de la grasa lubricante											

Figura 6.22: Diagrama FMECA del molino de bolas, parte 14. Elaboración propia.

22	Engrasado de rodamientos principales	U	Suministrar grasa automáticamente para reducir la fricción, el desgaste, amortiguar las oscilaciones, prevenir la corrosión y disipar el calor durante la rotación de los rodamientos principales	1	No suministra grasa a los rodamientos principales	B	Obstrucción en los conductos de lubricación	1	Contaminación de la grasa lubricante	Aumenta la presión dentro del sistema de engrasado, provocando fugas en juntas y sellos, generando una lubricación insuficiente o nula a los rodamientos y deterioro prematuro de la grasa estancada por efectos de temperaturas y presiones exteriores.	Disminuye la viscosidad de la grasa, aumentando la fricción en las superficies en contacto: rodillos, pistas y jaula; produciendo calor adicional, causando desgaste, deformación, grietas o surcos, generando vibraciones excesivas y ruidos anormales, resultando en desgaste acelerado y desplazamiento del rodamiento, que conduce a desalineamiento, activando las alarmas de temperatura y posición. Desgaste de revestimientos y bolas.	Las fugas afectan levemente la seguridad del personal, pero aumentan los riesgos de incendio. Disminuye la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se detiene el molino para reparación y cambio del sistema de lubricación, rodamientos y revestimientos, implicando costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos, sistema de engrase, bastidores y muñones, comprometiendo la estabilidad y soporte del molino, provocando altos riesgos de incendio y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	4	18
								2	Desgaste u obstrucción en el filtro de grasa							
								3	Acumulación de residuos de lubricante en los conductos							
								4	Desgaste o deformación en las mangueras de lubricación							
								5	Temperaturas extremas del ambiente							
						C	Temperatura muy alta o muy baja de la grasa	1	Desgaste del aislante de los conductos de lubricación	Degradación prematura de la grasa, provocando viscosidad excesiva y fugas de grasa en el sistema dada la expansión y contracción en juntas y sellos, disminuyendo el flujo y capacidad de lubricación, aumentando la fricción, causando incremento del desgaste y consumo de energía.	Aumenta la fricción en las superficies en contacto de los rodamientos: rodillos, pistas y jaula; produciendo calor adicional, causando desgaste, deformación, grietas o surcos, generando vibraciones excesivas y ruidos anormales, resultando en desgaste acelerado y desplazamiento del rodamiento, que conduce a desalineamiento, activando las alarmas de temperatura y posición. Desgaste de revestimientos y bolas.	Las fugas afectan levemente la seguridad del personal, pero aumentan los riesgos de incendio. Disminuye la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se detiene el molino para reparación y cambio del sistema de lubricación, rodamientos y revestimientos, implicando costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos, sistema de engrase, bastidores y muñones, comprometiendo la estabilidad y soporte del molino, provocando altos riesgos de incendio y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	3	17
								2	Sobrecalentamiento por fricción en los rodamientos							
								3	Contaminación de la grasa lubricante							
								4	Temperaturas extremas del ambiente							
								5	Bajo nivel de grasa							
						D	Baja presión de grasa	1	Obstrucción en los conductos del sistema	Flujo irregular de lubricante, con dificultad para alcanzar todos los puntos de lubricación de manera efectiva, provocando aumento de fricción en los componentes del sistema de engrase, elevando el desgaste y corrosión, disminuyendo así la lubricación en los rodamientos.	Aumenta la fricción en las superficies en contacto de los rodamientos: rodillos, pistas y jaula; produciendo calor adicional, causando desgaste, deformación, grietas o surcos, generando vibraciones excesivas y ruidos anormales, resultando en desgaste acelerado y desplazamiento del rodamiento, que conduce a desalineamiento, activando las alarmas de temperatura y posición. Desgaste de revestimientos y bolas.	Disminuye la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se detiene el molino para reparación y cambio en rodamientos, revestimientos y sistema de lubricación, implicando costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos, sistema de engrase, bastidores y muñones, comprometiendo la estabilidad y soporte del molino, provocando altos riesgos de incendio y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	3	17
								2	Mangueras desgastadas, sueltas o con fisuras							
								3	Desgaste u obstrucción en el filtro							
								4	Bajo nivel de grasa							
								5	Desgaste o daño en la bomba							
A	Bajo nivel de grasa en el sistema	1	Mangueras desgastadas, sueltas o con fisuras	Lubricación insuficiente en componentes del sistema como conductos de engrase, bombas y distribuidores, causando obstrucción parcial o total, generando fricción, llevando al desgaste, corrosión y sobrecalentamiento.	Disminución de la viscosidad de grasa, aumentando la fricción en dientes en contacto, produciendo calor, causándoles desgaste, deformación, grietas o fracturas, generando vibraciones y ruidos, resultando en desgaste acelerado, desplazamiento o desalineamiento de los engranajes, rodamientos y transmisión, activando las alarmas.	Las fugas afectan levemente la seguridad del personal, pero aumentan los riesgos de incendio. Disminuye la eficiencia de molienda y calidad. Detención para mantenimiento de engranajes, rodamientos, revestimientos y el sistema de lubricación, implicando costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico del sistema de engrase, engranajes, rodamientos, acoples, ejes y motor, provocando sobrecalentamiento, con altos riesgos de incendio y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	3	17						
		2	Falla interruptor de nivel de grasa del tanque													
		3	Obstrucción en los conductos del sistema													
		4	Contaminación de la grasa lubricante													
B	Baja presión de aire en atomizador	1	Desgaste de los filtros de aire	Aplicación inadecuada o insuficiente de grasa a los engranajes. La falta de presión de aire genera un esfuerzo excesivo de los componentes del sistema de rociado, provocándoles desgaste prematuro e incluso rotura, causando acumulación de residuos o grasa en los atomizadores, obstruyendo su funcionamiento.	La lubricación inadecuada aumenta la fricción en los dientes en contacto de los engranajes, aumentando la temperatura con riesgo de sobrecalentamiento, causando desgaste, deformación, grietas o fracturas, generando vibraciones excesivas y ruidos anormales, resultando en desgaste acelerado, desplazamiento o desalineamiento de los engranajes, rodamientos y transmisión, activando las alarmas de temperatura y posición.	Disminuye la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se detiene el molino para reparación y cambio en el sistema de engrase, engranajes, rodamientos, acoples, ejes y motor, implicando costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico del sistema de engrase, engranajes, rodamientos, acoples, ejes y motor, provocando sobrecalentamiento, con altos riesgos de incendio y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	2	8						
		2	Contaminación del aire de inyección													
		3	Conductos de aire con fisuras o daños en las conexiones													
		4	Falla en compresor de aire													
		5	Falla en las válvulas de control													
		6	Desgaste en el atomizador													
C	Obstrucción en los conductos de lubricación	1	Contaminación de la grasa lubricante	Aumenta la presión dentro del sistema de engrasado, provocando fugas en juntas y sellos, generando una lubricación insuficiente o nula a los engranajes y deterioro prematuro de la grasa estancada por efectos de temperaturas y presiones exteriores.	Disminuye la viscosidad de la grasa, aumentando la fricción en los dientes en contacto de los engranajes, aumentando la temperatura con riesgo de sobrecalentamiento, causando desgaste, deformación, grietas o fracturas, generando vibraciones excesivas y ruidos anormales, resultando en desgaste acelerado, desplazamiento o desalineamiento de los engranajes, rodamientos y transmisión, activando las alarmas de temperatura y posición.	Las fugas afectan levemente la seguridad del personal, pero aumentan los riesgos de incendio. Disminuye la eficiencia de molienda y calidad. Se detiene el molino para reparación y cambio del sistema de engrase, engranajes, rodamientos, acoples, ejes y motor, implicando costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico del sistema de engrase, engranajes, rodamientos, acoples, ejes y motor, provocando sobrecalentamiento, con altos riesgos de incendio y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	3	13						
		2	Desgaste u obstrucción en el filtro de grasa													
		3	Acumulación de residuos de lubricante en los conductos													
		4	Desgaste o deformación en las mangueras de lubricación													
		5	Temperaturas extremas del ambiente													

Figura 6.23: Diagrama FMECA del molino de bolas, parte 15. Elaboración propia.

Anexo E. Diagrama FMECA del molino SAG

Equipo	Sistema	Componente	Función	Estado de falla	Modo de falla				Efectos de falla				Riesgo inherente					
					Causa	Mecanismo	Efecto local	Efecto del siguiente nivel superior	Efecto final	Efecto potencial en el peor de los casos	Pted	P	C	R				
		1	Carcasa	A	1	No contiene la carga	A	Grietas o fisuras de las placas de la carcasa	1 Fatiga de las placas	Fugas de pulpa a través de las grietas, que deterioran el exterior de la carcasa, provocando corrosión y aumento de su tamaño hasta el eventual desprendimiento de la placa.	La carcasa pierde estructura, generando caída de revestimientos y pérdida de carga, lo que provoca desbalanceo del molino, deformación o fractura de la carcasa, rotura de bolas, desgaste de las bombas del cajón, aumento de vibraciones en los rodamientos y engranajes causando desalineamiento y sobrecalentamiento. Esto activa interruptores de posición y temperatura, disparando las alarmas.	El derrame de carga compromete gravemente la seguridad del personal y la zona de cimientos. Se detiene el molino para reparación y cambio de placas, revestimientos, bolas y el alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	El fallo de la protección resultaría en el colapso catastrófico de los rodamientos, piñón y corona, provocando la avería del motor y reductor principal por el desalineamiento, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves al personal. También, se debilitan los cimientos, comprometiendo la estabilidad estructural. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	2	5	19		
								2 Sobrecarga de alimentación en el molino										
								3 Desalineamiento del cilindro con el eje del molino										
								4 Impactos en las placas de la carcasa										
								5 Abrasión debido al material o al efecto de Pulp Racing*										
								6 Desgaste de los revestimientos										
								7 Corrosión										
							B	Desgaste o rotura de empaquetaduras de los pernos de sujeción de los revestimientos	1 Impactos en los revestimientos	La unión del perno pierde integridad, presentando fugas de pulpa, provocando corrosión en la carcasa y que se suelten los revestimientos hasta su desprendimiento.	El desprendimiento del revestimiento genera desequilibrio en el molino, aumentando el desgaste de revestimientos y bolas, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se propaga la corrosión, aumentando las fugas y vibraciones, afectando los rodamientos, engranajes, causando desalineación, elevando las temperaturas, lo que activa las alarmas.	El derrame de carga compromete la seguridad del personal y la zona de cimientos. Se detiene el molino para reparación y cambio de revestimientos, placas, bolas, empaquetaduras, pernos y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y de producción por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos, piñón y corona, provocando la avería del motor y reductor principal por el desalineamiento, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves al personal. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	3	13		
									2 Vibraciones excesivas									
									3 Corrosión									
									4 Fricción debido al movimiento rotativo del molino									
									5 Estrés excesivo por mal torque de pernos									
							2	No es capaz de sostener los revestimientos	A	Desgaste, deformación o fractura de la estructura de la carcasa	1 Sobrecarga de alimentación en el molino	Soltura y desalineamiento de juntas y revestimientos, presentando fugas de pulpa en juntas, sellos y fracturas de la carcasa, que corroen la estructura y sujeciones, llegando incluso al desprendimiento de los revestimientos.	Se genera desbalanceo en el molino, lo que incrementa el desgaste de la carcasa, sujeciones y revestimientos, resultando en un aumento de fugas, reduciendo la eficiencia de molienda y calidad del producto, además de aumentar el desgaste de las bombas del cajón y vibraciones, afectando a los rodamientos y engranajes, provocando su desalineamiento y aumento de temperaturas, lo que activa las alarmas de posición y temperatura.	El derrame de carga compromete la seguridad del personal y la zona de cimientos. Se detiene la producción para el cambio de revestimientos, sello, placas, pernos y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y de producción por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos, piñón y corona, provocando la avería del motor y reductor principal por el desalineamiento, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves al personal. También, se debilitan los cimientos, comprometiendo la estabilidad estructural. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	4	18
											2 Desalineamiento del cilindro con el eje del molino							
					3 Impactos en la estructura de la carcasa													
					4 Corrosión													
					5 Abrasión debido al material o al efecto de Pulp Racing*													
					6 Desgaste de los revestimientos													
		2	Cabezales	B	1	No brinda sello a los extremos del cilindro y no contiene la carga	A	Desalineamiento del cabezal con la carcasa y los muñones	1 Sobrecarga de alimentación en el molino	Fricción y temperatura en las juntas de la carcasa y muñones debido al contacto irregular, resultando en desgaste de sellos y vibraciones, elevando el riesgo de empaquetaduras, vibraciones, ruidos anormales en el molino y fugas leves de lubricante.	Aumenta el desgaste de los sellos, presentando fugas de agua o pulpa alrededor de las juntas, junto con incremento de vibraciones en los apoyos, distribuyendo las cargas desigualmente en los muñones, elevando el riesgo de desgaste y fracturas en las juntas con el cabezal. El desequilibrio se transmite a los engranajes y rodamientos, aumentando las temperaturas y el movimiento, lo que activa los interruptores y alarmas.	Las fugas representan un riesgo para la seguridad de las personas e impactan en la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se detiene la producción para el cambio de sellos, empaquetaduras y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos, piñón, corona, deformación severa de las juntas y revestimientos, provocando la avería del motor y reductor principal por el desalineamiento, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves al personal. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	5	22		
									2 Impactos en el cilindro del molino									
									3 Fatiga del material en las uniones									
									4 Vibraciones excesivas debido a desgaste de los revestimientos o desbalanceo del molino									
									5 Desgaste de los rodamientos principales									
							B	Grietas o fractura de las placas del cabezal	1 Fatiga del material de las placas	Fugas de pulpa a través de las grietas, que deterioran el exterior del cabezal y sus juntas con la carcasa, provocando corrosión y aumento de su tamaño hasta el eventual desprendimiento de la placa.	El cabezal pierde el sellado en los extremos e integridad estructural, generando caída, desgaste de revestimientos y pérdida de carga, lo que provoca desbalanceo del molino, aumentando las vibraciones en los rodamientos y engranajes, causando desalineamiento y sobrecalentamiento. Esto activa los interruptores de posición y temperatura, junto con las alarmas.	El derrame de carga compromete gravemente la seguridad del personal y la zona de cimientos. Se detiene el molino para el cambio de placas, revestimientos, sellos y el alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico del cabezal, rodamientos, piñón y corona, provocando la avería del motor y reductor principal por el desalineamiento, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves al personal. También, se debilitan los cimientos, comprometiendo la estabilidad estructural. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	1	5	15		
									2 Impactos en las placas del cabezal									
									3 Desalineamiento con la carcasa y muñones									
									4 Abrasión debido al material o al efecto de Pulp Racing*									
									5 Sobrecarga de alimentación en el molino									
					6 Corrosión													
					C	Desgaste o fractura de las uniones con la carcasa y los muñones	1 Acumulación de polvo o partículas abrasivas en las uniones	Microfisuras que debilitan la unión y aumentan las vibraciones del molino. Esto incrementa la presión y fricción, provocando quebres, deformaciones en la unión y aflojamiento de pernos, intensificando vibraciones y ocasionando fugas de pulpa.	El cabezal pierde sellado en los extremos, lo que provoca fugas y corrosión que debilitan la estructura de la unión, así como los sellos, cabezal y carcasa, aumentando las grietas y fracturas, lo que conduce al desalineamiento, generando vibraciones excesivas que afectan a los rodamientos, engranajes, ejes y acoples, provocando un desgaste prematuro y elevación de temperaturas, activando las alarmas.	Las fugas afectan la seguridad y la eficiencia de la molienda, requiriendo la detención de la producción para reparar y reemplazar sellos, empaquetaduras, pernos, placas y flanges, además de realinear componentes. Esto conlleva costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Rotura catastrófica de uniones, incapacidad de sostener el molino, derrames y riesgos de lesiones graves. Falla catastrófica de rodamientos, piñón, corona, cabezal y carcasa, averiando el motor y reductor principal, aumentando riesgos de incendio y lesiones. Esto implicaría una prolongada inactividad, pérdida de producción y altos costos de mantenimiento.	3	5	22				
							2 Fatiga del material de las uniones											
							3 Corrosión											
							4 Desalineamiento con la carcasa y muñones											

Figura 6.25: Diagrama FMECA del molino SAG, parte 1. Elaboración propia.

I	Estructural	3	Muñones de los cabezales	C	Proporcionar soporte al tambor funcionando como ejes de rotación, ubicados en los extremos para alojar los rodamientos principales	1	No soporta el cilindro del molino	A	Desgaste, deformación o fractura de la estructura del muñón	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Se debilita la estructura del muñón y capacidad de soporte del cilindro, aumentando la tensión en el área de transición a la carcasa. Esto ocasiona ruidos anormales, vibraciones excesivas, fugas de pulpa a través de las fracturas, aumento de temperatura y desalineamiento con el cilindro.	Corrosión en la superficie que debilita la unión del muñón a la carcasa. Aumento del volumen de sólidos y bolas en el molino, incrementando el desgaste y riesgo de golpes en la carcasa, desgaste o rotura de bolas y desgaste de revestimientos, implicando pérdida de eficiencia y calidad del producto. Esto genera aumento de las vibraciones y desalineamiento, afectando a los rodamientos, engranajes, ejes y acoples, al igual que sus temperaturas, activando las alarmas.	El derrame de carga compromete la seguridad del personal, de los rodamientos y sus soportes, aumentando su desgaste y temperaturas, conduciéndolos a falla catastrófica. Se detiene el molino para reparación y cambio de revestimientos, bolas, muñón, rodamientos y alineamiento, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y de producción por inactividad.	Fractura catastrófica del muñón, provocando caída o soltura del cilindro, desplomándose el molino, siendo de riesgo muy grave o fatal al personal. Además, causaría daños extensos en los rodamientos, sistema de transmisión y carcasa, conllevando en una reparación costosa y prolongada, así como en una pérdida significativa de producción.	2	5	19
										2	Corrosión							
										3	Fatiga del material de la estructura							
										4	Desalineamiento con el cabezal							
										5	Abrasión debido al material o al efecto de Pulp Racing*							
										6	Impactos en la estructura del muñón							
	2	No es capaz de sostener los revestimientos	A	Desgaste, deformación o fractura de la estructura del cabezal	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Soltura y desalineamiento de juntas y revestimientos, presentando fugas de lubricante o pulpa en juntas y alrededor de pernos, provocando microfisuras en el cabezal que crecen hasta su fractura, corroyendo la estructura y sujeciones, llegando incluso al desprendimiento de los revestimientos.	Se genera desbalanceo en el molino, lo que incrementa el desgaste del cabezal, sujeciones y revestimientos, resultando en aumento de fugas, reduciendo la eficiencia de molienda y calidad del producto, además de aumentar el desgaste de las bombas del cajón e incrementar las vibraciones, afectando a los rodamientos y engranajes, provocando su desalineación, elevando sus temperaturas, lo que activa los interruptores y alarmas.	El derrame de carga compromete la seguridad del personal y la zona de cimientos. Se detiene la producción para reparación y cambio de revestimientos, sellos, placas, pernos y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico del cabezal, rodamientos, piñón y corona, provocando la avería del motor y reductor principal por el desalineamiento, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves. También, se debilitan los cimientos, comprometiendo la estabilidad estructural. Esto conlleva a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	2	5	19					
					2	Impactos en la estructura del cabezal												
					3	Desalineamiento con la carcasa y muñones												
					4	Corrosión												
					5	Fatiga del material de la estructura												
					6	Abrasión debido al material o al efecto de Pulp Racing*												
3	No sostiene el rodamiento	A	Desgaste, deformación o fractura de la estructura del muñón	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Se debilita la estructura del muñón y capacidad de soporte del rodamiento, aumentando la holgura. Esto ocasiona ruidos anormales, vibraciones excesivas, fugas de pulpa a través de las fracturas, aumento de temperatura y desalineamiento con el rodamiento.	Corrosión en la superficie del muñón y rodamiento. Aumento del volumen de sólidos y bolas en el molino, incrementando el desgaste y riesgo de golpes en la carcasa, desgaste o rotura de bolas y desgaste de revestimientos y sus sujeciones, implicando pérdida de eficiencia y calidad del producto. Esto genera aumento de las vibraciones y el desalineamiento de los rodamientos, afectando además, a los engranajes, ejes y acoples, elevando sus temperaturas y activando las alarmas.	El derrame de carga compromete la seguridad del personal, de los rodamientos y sus soportes, aumentando su desgaste y temperaturas, conduciéndolos a falla catastrófica. Se detiene el molino para reparación y cambio de revestimientos, bolas, muñón, rodamientos y alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Fractura catastrófica del muñón, provocando soltura del cilindro y rodamientos, ocasionando una detención inmediata del molino y planta, siendo de grave riesgo al personal. Además, causaría daños extensos al sistema de transmisión y carcasa, conllevando una reparación costosa y prolongada, así como una pérdida significativa de producción.	3	4	18						
				2	Corrosión													
				3	Fatiga del material de la estructura													
				4	Desalineamiento con el cabezal													
				5	Abrasión debido al material o al efecto de Pulp Racing*													
				6	Impactos en la estructura del muñón													
4	Revestimiento o respaldo de acero	D	Proteger la estructura interna del molino contra el desgaste, además de asentar los revestimientos de levante	1	No protege la estructura interna del molino	A	Desgaste, rotura, deformación o desprendimiento del respaldo de goma de la carcasa	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Exposición de la estructura interna de la carcasa a los impactos y abrasión, lo que genera desgaste, deformación o eventual fractura. Disminuye la capacidad de asentar los revestimientos, provocando que se suelten, afectando la eficiencia de molienda.	Desgaste desigual y aumento de soltura de revestimientos, lo que puede llevar a su caída, generando desequilibrio y desalineación en rodamientos y uniones, aumentando las vibraciones, provocando desgaste prematuro. Desalineamiento de engranajes, ejes y acoples, lo que eleva las temperaturas, activando las alarmas. Además, la carcasa puede filtrar pulpa a través de las fisuras provocando corrosión.	Desprendimiento de revestimientos y placas de la carcasa, que causa fugas de pulpa, reduce la eficiencia y calidad de molienda, representando un riesgo grave para el personal y la estructura del molino. Se detiene el molino para reparaciones y reemplazos, implicando pérdida de material, costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de la carcasa, rodamientos, engranajes, ejes y acoples, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves. También, se debilitan los cimientos, comprometiendo la estabilidad estructural. Esto conlleva a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	4	21		
								2	Fricción con los revestimientos de levante									
								3	Impactos de la carga									
								4	Rotura de uniones del respaldo									
								5	Sobrecarga de alimentación en el molino									
D	Desgaste de sellos o empaquetaduras de uniones y pernos de sujeción	1	Acumulación de polvo o partículas abrasivas en las uniones	La unión pierde integridad, presentando fugas leves de lubricante o pulpa alrededor de sellos y empaquetaduras, provocando corrosión y aflojamiento en pernos de la unión y revestimientos, que va corroyendo el cabezal, ocasionando soltura de los revestimientos hasta su desprendimiento.	Desalineamiento gradual del cabezal, desequilibrio en el molino, aumentando el desgaste de revestimientos y bolas, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se propaga la corrosión, aumentando las fugas, resultando en vibraciones adicionales que afectan a los rodamientos y engranajes, causando desalineación e incremento de temperaturas, lo que activa interruptores y alarmas.	El derrame de carga continuo compromete la seguridad del personal y la zona de cimientos. Se detiene el molino para reparación y cambio de revestimientos, placas, bolas, sellos, empaquetaduras, pernos y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Fallo completo de los sellos y empaquetaduras de la unión y pernos de sujeción, provocando el colapso catastrófico de los rodamientos, piñón y corona, causando la avería del motor y reductor principal por el desalineamiento, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves. Esto conlleva a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	3	17								
								2	Fricción debido al movimiento rotativo del molino									
								3	Corrosión									
								4	Vibraciones excesivas									
								5	Desalineamiento con la carcasa, muñones y pernos de sujeción									

Figura 6.26: Diagrama FMECA del molino SAG, parte 2. Elaboración propia.

5	E	Revestimiento de carcasa y cabezales	Proteger el interior de la carcasa y cabezales del molino del impacto y desgaste, levantar la carga durante la molienda generando el efecto cascada y catarata, sostener las placas de la carcasa y cabezales en su lugar	1	No protege el interior de la carcasa y cabezales	A	Desgaste o fractura de los revestimientos de levante y de goma de la carcasa	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Estructura interna de cabezales y carcasa propensa a impactos y abrasión, generándose desgaste, deformación o fractura, provocando fugas de pulpa y sultura de los revestimientos de levante.	Corrosión en placas del cilindro, provocando pérdida de carga y desprendimiento de revestimientos, generando desbalanceo, disminución de eficiencia y calidad del producto, rotura de bolas, desgaste de las bombas del cajón, aumento de vibraciones en rodamientos, engranajes, ejes y acoples, causando desalineamiento y sobrecalentamiento, activando las alarmas.	El derrame de carga compromete gravemente la seguridad del personal y la zona de cimientos. Se detiene el molino para reparación y cambio de placas, revestimientos, bolas y alineamiento de componentes, implicando costos por mantenimiento, pérdidas de material y económicas por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos, piñón y corona, provocando la avería del motor y del reductor principal por el desalineamiento, aumentando los riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones graves al personal. También, se debilitan los cimientos, comprometiendo la estabilidad estructural. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	3	17
								2	Impactos a los revestimientos							
								3	Abrasión continua de la carga a los revestimientos							
								4	Fatiga de los revestimientos por carga cíclica							
								5	Bajo flujo de agua							
								6	Desalineamiento de los revestimientos							
				2	B	Revestimientos sueltos o caídos	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Exposición abierta de la estructura interna de cabezales y carcasa frente a impactos y abrasión, generándose desgaste, deformación o fractura, provocando fugas de pulpa y sultura de las placas de las estructuras.	Corrosión en placas, debilitando el material hasta su desprendimiento. Esto genera pérdida de carga, provocando desbalanceo, disminución de eficiencia y calidad, rotura de bolas, desgaste de bombas del cajón, aumento de vibraciones en rodamientos, engranajes, ejes y acoples, causando desalineamiento y sobrecalentamiento, activando las alarmas.	Los derrames afectan gravemente la seguridad del personal y cimientos. Se detiene el molino para reparación y cambio de placas, revestimientos, bolas y alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de materia y económica por inactividad.	Colapso catastrófico de rodamientos, revestimientos y transmisión, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	3	13	
							2	Impactos a los revestimientos								
							3	Fatiga de los revestimientos por vibraciones								
							4	Pernos sueltos o rotos								
				3	A	Desgaste o fractura de los revestimientos de levante	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Disminución de la capacidad de levante, provocando distribución desigual del material dentro del molino, no generándose el efecto deseado, aumentando la fricción y desgaste de los revestimientos y medios de molienda.	Disminución de la eficiencia de molienda y calidad del producto. Atascos de material, produciéndose una distribución desigual de cargas y fuerzas, aumentando la tensión en la estructura del molino, generando deformaciones, fisuras o fracturas, presentando fugas de pulpa. Esto provoca desbalanceo y vibraciones excesivas en rodamientos, engranajes, ejes y acoples, causando desalineamiento y sobrecalentamiento, activando las alarmas.	Las fugas afectan levemente la seguridad del personal y la estructura por corrosión. Se detiene el molino para reparación y cambio de placas, revestimientos, bolas y el alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de la carcasa, cabezales, rodamientos, revestimientos, engranajes, ejes y acoples, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	3	17	
							2	Impactos a los revestimientos								
							3	Abrasión continua de la carga a los revestimientos								
							4	Fatiga de los revestimientos por carga cíclica								
							5	Bajo flujo de agua								
				4	B	Velocidad de rotación muy baja o muy alta (crítica)	1	Falla en el variador de frecuencia del motor	Disminución y sobre levantamiento de la carga, no generándose el efecto deseado. Aumenta la fricción entre el material, las bolas y los revestimientos, acelerando el desgaste.	Desequilibrio en la distribución de carga, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se genera desbalanceo, aumentando las vibraciones en rodamientos, engranajes, ejes, acoples y estructura, causando desalineamiento y aumento de tensiones, activando las alarmas.	Ruidos anormales y desgaste prematuro, implicando una detención del molino para reparación y cambio de revestimientos, bolas y el alineamiento de los componentes, provocando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de rodamientos, revestimientos, engranajes, estructura, ejes y acoples, aumentando los riesgos de fracasos, derrames de carga, incendios y lesiones graves. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	3	13	
							2	Desgaste en el embrague de aire principales								
							3	Lubricación insuficiente de los rodamientos								
							4	Vibraciones excesivas debido a desbalanceo del molino								
							5									
3	A	Revestimientos de levante sueltos, rotos o caídos	1	Abrasión continua de la carga a los revestimientos	Disminución o nula capacidad de levante, provocando distribución desigual y atascos del material dentro del molino, aumentando la fricción y desgaste de los revestimientos y medios de molienda. Fugas de pulpa a través de los orificios de sujeción de los revestimientos.	Disminución de la eficiencia, capacidad de molienda y calidad del producto. Distribución desigual de cargas y fuerzas, aumentando la tensión en la estructura del molino, generando deformaciones, fisuras o fracturas, presentando fugas de pulpa y corrosión. Esto provoca desbalanceo y vibraciones excesivas en rodamientos, engranajes, ejes y acoples, causando desalineamiento y sobrecalentamiento, activando las alarmas.	Las fugas afectan levemente la seguridad del personal, pero gravemente la estructura por corrosión. Se detiene el molino para reparación y cambio de placas, revestimientos, bolas y el alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de rodamientos, engranajes, ejes, acoples y estructura, aumentando riesgos de incendio y lesiones graves al personal. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	3	13					
			2	Sobrecarga de alimentación en el molino												
			3	Impactos a los revestimientos												
			4	Fatiga de los revestimientos por vibraciones												
			5	Pernos sueltos o rotos												
4	A	Pernos de los revestimientos sueltos, rotos o desprendidos	1	Tensión aplicada insuficiente	La unión del perno pierde integridad, presentando fugas de pulpa a su alrededor, provocando corrosión en la carcasa y cabezales. Se desplazan o sueltan las placas y los revestimientos de levante.	Fricción y aumento del desgaste en placas y revestimientos, provocando aumento de vibraciones, lo que eleva el riesgo de desprendimiento de placas y revestimientos. Esto genera derrame de carga del molino, disminuyendo la eficiencia, capacidad de molienda y calidad del producto, ocasionando desbalanceo y vibraciones excesivas en rodamientos, engranajes, ejes y acoples, causando desalineamiento y sobrecalentamiento, activando las alarmas.	Los derrames afectan gravemente la seguridad del personal y los cimientos. Se detiene el molino para reparación y cambio de placas, revestimientos, pernos y alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y económica por inactividad.	Colapso catastrófico de la carcasa, cabezales, rodamientos, engranajes, ejes y acoples, sobrecargando el motor y reductor principal, aumentando riesgos de incendio y lesiones muy graves al personal. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	4	21					
			2	Vibraciones excesivas												
			3	Desgaste o deformación de los pernos												
			4	Corrosión												
			5	Distribución de carga irregular en los pernos por desgaste de los revestimientos												

Figura 6.27: Diagrama FMECA del molino SAG, parte 3. Elaboración propia.

6	Motor principal	F	Transformar la energía eléctrica en energía mecánica rotacional, con una potencia de 1100 Kw	1	No transforma la energía o entrega menor potencia que 1100 kW	A	Baja tensión eléctrica	1	Fluctuaciones en la red eléctrica	Aumento de la corriente eléctrica del motor, elevando su temperatura, provocando daños internos en devanados, rotor y estator, disminuyendo el rendimiento, velocidad de giro y el par transmitido.	Aumento de carga en reductor, causando desgaste, deformación o fractura, expandiéndose a engranajes, rodamientos, ejes y acoples, resultando en falta de control de velocidad de giro, provocando arranque brusco e impactos, desgastando los revestimientos y bolas, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad, elevando temperaturas y activando las alarmas.	Activación del giro lento para reparación y cambio del motor, reductor, engranajes, rodamientos, revestimientos, ejes y acoples, implicando costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico del motor, reductor, ejes y acoples, con altos riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de reparación.	3	3	13	
								2	Conexiones eléctricas dañadas								
							B	Daños en los devanados del estator o rotor del motor	1	Sobrecalentamiento debido a carga excesiva en el motor o ventilación insuficiente	Cortocircuito en devanados, elevando la temperatura, provocando pérdida de eficiencia en conversión de energía, disminuyendo la velocidad de giro y par transmitido.	Aumento de carga en reductor, causando desgaste, deformación o fractura, expandiéndose a engranajes, rodamientos, ejes y acoples, resultando en falta de control de velocidad de giro, provocando arranque brusco e impactos, desgastando los revestimientos y bolas, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad, elevando temperaturas y activando las alarmas.	Riesgo de incendio del motor afectando gravemente la seguridad. Activación del giro lento para reparación y cambio del motor, reductor, engranajes, rodamientos, revestimientos, ejes y acoples, implicando costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico del motor, reductor, ejes y acoples, con altos riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de reparación.	2	5	19
									2	Fluctuaciones en la red eléctrica							
							C	Falla en el variador de frecuencia del motor	1	Fluctuaciones en la red eléctrica	Pérdida total o parcial del control de velocidad de giro y fluctuaciones en el voltaje, causando un funcionamiento fuera de las especificaciones de diseño, provocando desgaste prematuro en componentes internos del motor, rodamientos y eje, elevando sus temperaturas y vibraciones.	Aumento de carga en reductor, causando desgaste, deformación o fractura, expandiéndose a engranajes, rodamientos, ejes y acoples, resultando en falta de control de velocidad de giro, provocando arranque brusco e impactos en el molino, desgastando los revestimientos y bolas, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto, elevando las temperaturas y activando las alarmas.	Activación del giro lento para reparación y cambio del motor, reductor, engranajes, rodamientos, revestimientos, ejes y acoples, implicando costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico del motor, reductor, ejes y acoples, con altos riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de reparación.	5	4	23
									2	Desgaste y envejecimiento de los componentes internos del VDF							
						3			Sobrecalentamiento por ventilación insuficiente								
						D	Desgaste de los rodamientos del eje del motor	1	Lubricación insuficiente de los rodamientos	Fricción entre superficies en contacto del rodamiento, generando calor, vibraciones y ruidos, elevando la temperatura en el eje, provocándole desgaste	Aumento de carga en reductor, causando desgaste, deformación o fractura, expandiéndose a ejes, engranajes, rodamientos y acoples, resultando en disminución de velocidad de giro, desgastando los revestimientos y bolas, lo que incrementa el consumo de energía, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se elevan las temperaturas, activando las alarmas.	Activación del giro lento para reparación y cambio del motor, reductor, engranajes, rodamientos, revestimientos, ejes y acoples, implicando costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico del motor, reductor, ejes y acoples, con altos riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de reparación.	3	3	13	
								2	Ingreso de partículas contaminantes al rodamiento								
								3	Sobrecarga de alimentación en el molino								
								4	Desalineamiento entre el eje del motor y el eje del reductor								
						E	Desalineamiento del eje del motor con el eje del reductor de velocidad	1	Impactos en el motor o reductor	Carga desigual que genera desgaste, deformación, fractura o desalineación de rodamientos del motor, rodamientos, ejes y engranajes del reductor, y acoples, elevando la fricción, lo que aumenta vibraciones, ruido y temperaturas, reduciendo la velocidad de giro y potencia.	Aumento de carga en ejes, engranajes, acoples y rodamientos, causando desgaste, deformación, fractura o desalineamiento, resultando en disminución de velocidad de giro, desgastando los revestimientos y bolas, lo que incrementa el consumo de energía, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se elevan las temperaturas, activando las alarmas.	Activación del giro lento para reparación y cambio del motor, reductor, engranajes, rodamientos, revestimientos, ejes y acoples, implicando costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico del motor, reductor, ejes y acoples, con altos riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de reparación.	3	2	8	
								2	Desgaste de los acoplamientos								
								3	Sobrecarga de alimentación en el molino								
								4	Desalineamiento en la estructura del molino								
						A	Desgaste, deformación o fractura de los dientes de los engranajes	1	Desalineamiento de los ejes y engranajes	Pérdida de contacto efectivo entre dientes de los engranajes, lo que reduce la eficiencia de transmisión de potencia del reductor, provocando pérdida del control de la velocidad de giro y torque del molino, ocasionando vibraciones, ruidos anormales, cargas desiguales y aumento de temperatura, afectando los ejes y rodamientos, causando desgaste prematuro o deformación.	Aumenta la carga en motor y eje del piñón, provocando fricción, que causa desgaste, deformación, desalineamiento o fractura en el piñón, elevando sus temperaturas, disminuyendo la transmisión de potencia al tambor. Esto, aumenta la carga en los rodamientos principales, generando desgaste, desalineamiento, vibraciones y ruidos excesivos, lo que agrava el desgaste de revestimientos y bolas, incrementa el consumo energético y reduce la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se activan alarmas de temperatura y posición.	Se detiene el molino para reparación y cambio del reductor de velocidad, piñón, corona, ejes, rodamientos, revestimientos, acoples, motor y el alineamiento de componentes, implicando altos costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico del reductor de velocidad, engranajes, rodamientos, ejes, acoples, y motor principal, resultando en altos riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	3	17	
								2	Sobrecarga de alimentación en el molino								
								3	Impactos en el reductor								
								4	Lubricación insuficiente en los engranajes								
								5	Contaminación del lubricante de los engranajes								
								6	Fatiga del material de los engranajes por cargas cíclicas								

Figura 6.28: Diagrama FMECA del molino SAG, parte 4. Elaboración propia.

7	Reductor de velocidad principal	G	Ajustar y reducir la velocidad de rotación proveniente del motor principal a un rango entre 12,7 y 15,2 rpm, para aumentar el torque transmitido al piñón y mover el tambor del molino	1	No reduce la velocidad de giro lo suficiente para aumentar al torque requerido	B	Desgaste en los rodamientos de los ejes	1	Desalineamiento entre ejes y rodamientos	Aumenta la fricción y temperatura, generando pérdida de carga, aumento del juego radial y axial, posibles deformaciones o fracturas en los rodamientos, produciendo vibraciones y ruidos anormales, causando desgaste, deformación o fractura en ejes y engranajes, disminuyendo la eficiencia de transmisión de potencia del reductor, provocando pérdida del control de la velocidad de giro y torque del molino.	Aumenta la carga en motor y eje del piñón, provocando fricción, que causa desgaste, deformación, desalineamiento o fractura en ejes, engranajes, rodamientos del motor y del piñón, elevando sus temperaturas, disminuyendo la transmisión de potencia a los rodamientos principales, generando desgaste, desalineamiento, vibraciones y ruidos excesivos, lo que agrava el desgaste de revestimientos y bolas, incrementa el consumo energético y reduce la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se activan alarmas de temperatura y posición.	Se detiene el molino para reparación y cambio del reductor de velocidad, piñón, corona, ejes, rodamientos, revestimientos, acoples, motor y el alineamiento de componentes, implicando altos costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico del reductor de velocidad, engranajes, rodamientos, ejes, acoples, y motor principal, resultando en altos riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.				3	3	13														
								2	Lubricación insuficiente en rodamientos																								
								3	Sobrecarga de alimentación en el molino																								
								4	Ingreso de partículas contaminantes al rodamiento																								
						C	Desalineamiento de ejes, rodamientos o engranajes	1	Desgaste en los rodamientos, ejes o engranajes	Fricción y distribución desigual de la carga, resultando en desgaste prematuro e irregular, deformación o fractura en los rodamientos, ejes y engranajes, generando vibraciones, aumento de temperatura, ruidos anormales y fugas leves de lubricante, disminuyendo la eficiencia de transmisión de potencia del reductor.	Aumenta la carga en motor y eje del piñón, provocando fricción, que causa desgaste, deformación, desalineamiento o fractura en ejes, engranajes, rodamientos del motor y del piñón, elevando sus temperaturas, disminuyendo la transmisión de potencia al tambor. Esto, aumenta la carga en los rodamientos principales, generando desgaste, desalineamiento, vibraciones y ruidos excesivos, lo que agrava el desgaste de revestimientos y bolas, incrementa el consumo energético y reduce la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se activan alarmas de temperatura y posición.	Las fugas de lubricante afectan levemente la seguridad del personal, aumentando riesgos de incendio. Se detiene el molino para reparación y cambio del reductor de velocidad, piñón, corona, ejes, rodamientos, revestimientos, acoples, motor y el alineamiento de componentes, implicando altos costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico del reductor de velocidad, engranajes, rodamientos, ejes, acoples, y motor principal, resultando en altos riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.																				
								2	Impactos en el reductor																								
								3	Vibraciones excesivas del molino																								
								4	Sobrecarga de alimentación en el molino																								
						8	Corona	H	Transmitir la potencia mecánica desde el piñón hacia el tambor del molino mediante el engranaje helicoidal simple de sus dientes	1	No transmite potencia mecánica al tambor	A	Desgaste, deformación o fractura de dientes de la corona	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Disminución de la eficiencia de transmisión de la potencia mecánica al tambor. Distribución desigual de carga sobre los rodamientos, provocando vibraciones excesivas en el molino, que elevan los esfuerzos en la estructura del cilindro. Esto provoca desalineamiento de los rodamientos principales y secundarios, aumentando sus temperaturas, lo que activa las alarmas.	Disminución de la eficiencia, capacidad de molienda y calidad del producto. Aumento de la carga sobre los rodamientos principales, acelerando su desgaste, provocando vibraciones excesivas en el molino, que elevan los esfuerzos en la estructura del cilindro. Esto provoca desalineamiento de los rodamientos principales y secundarios, aumentando sus temperaturas, lo que activa las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio de la corona, piñón, rodamientos y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de la corona, piñón, rodamientos principales y secundarios, ejes y acoples, aumentando riesgos de lesiones graves al personal. Esto conllevaría una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.														
														2	Desalineamiento de la corona con el piñón																		
														3	Lubricación de grasa insuficiente piñón - corona																		
														4	Fatiga del material de la corona por carga cíclica																		
5	Contaminación del lubricante																																
6	Impactos en la corona por falla en la protección																																
B	Alta fricción entre dientes de contacto piñón - corona	1	Acumulación de partículas en la corona	Incremento de temperatura en la zona de contacto, provocando un desgaste acelerado y deformación en los dientes, lo que genera partículas metálicas finas que pueden contaminar el lubricante, resultando en aumento de vibraciones y disminución de la eficiencia de transmisión de potencia mecánica.	Vibraciones excesivas y cargas adicionales que provocan desgaste prematuro en ejes, rodamientos del piñón y rodamientos principales, causando desalineamiento de los rodamientos, generando un desequilibrio y aumento de tensión de la estructura de la carcasa, ocasionando desgaste, deformación o fisuras en ella, lo que origina fugas de pulpa, corrosión y pérdida de soporte para la corona. Se elevan las temperaturas en rodamientos activando las alarmas. Disminuye la eficiencia y calidad del producto.							Las fugas afectan levemente la seguridad del personal, pero gravemente la estructura por corrosión. Se detiene el molino para reparación y cambio de la corona, piñón, placas, rodamientos, ejes y el alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de engranajes, rodamientos, ejes, acoples y estructura, sobrecalentando el motor y reductor principal, aumentando riesgos de incendios, daños eléctricos y lesiones graves al personal. Esto conllevaría una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.																				
		2	Lubricación de grasa insuficiente piñón - corona																														
		3	Contaminación del lubricante																														
		4	Desalineamiento de la corona con el piñón																														
		5	Desgaste, deformación o fractura de los dientes de la corona																														
C	Desalineamiento de la corona con el piñón	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Aumento de fricción entre el piñón y la corona, elevando la temperatura en zona de contacto, resultando en desgaste prematuro de los dientes y deformación, contaminando el lubricante, aumentando ruidos y vibraciones, disminuyendo la eficiencia de transmisión.	Vibraciones y cargas excesivas que provocan desgaste prematuro en ejes, rodamientos del piñón y principales, causando desalineamiento de rodamientos y acoples, generando desequilibrio y aumento de tensión en la estructura de la carcasa, ocasionándole desgaste, deformación o fisuras, que origina fugas de pulpa y corrosión. Se elevan las temperaturas activando las alarmas. Pérdida de eficiencia de molienda y calidad del producto.							Las fugas afectan levemente la seguridad del personal, pero gravemente la estructura por corrosión. Se detiene el molino para reparación y cambio de la corona, piñón, placas, rodamientos, ejes y el alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de engranajes, rodamientos, ejes, acoples y estructura, sobrecalentando el motor y reductor principal, aumentando riesgos de incendios, daños eléctricos y lesiones graves al personal. Esto conllevaría una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.																				
		2	Desgaste, deformación o fractura de los dientes o estructura de la corona																														
		3	Impactos en la corona																														
		4	Desbalanceo del molino																														

Figura 6.29: Diagrama FMECA del molino SAG, parte 5. Elaboración propia.

II Accionamiento		I Piñón		1		1		1		1		1		1		1		1	
D	Fractura o deformación en la estructura de la carcasa	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Desalineamiento de la corona con el piñón, soltura y pérdida de soporte para la corona, disminuyendo la eficiencia de transmisión de potencia, aumentando las vibraciones y ruidos.	Fricción entre los dientes de la corona y piñón, aumentando su temperatura, provocando desgaste y deformación. Fugas de pulpa en fracturas de la carcasa, que corroe su estructura y la de la corona, debilitando el soporte y desgastando la corona. Vibraciones excesivas que desgastan y desalinean los ejes, acoples y rodamientos, lo que eleva sus temperaturas y activa las alarmas. Disminución de la eficiencia de molienda y calidad del producto.	El derrame de carga compromete la seguridad del personal y la zona de ciemientos. Se detiene la producción para reparación y cambio de la corona, piñón, rodamientos, placas y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico de la corona, piñón, rodamientos, ejes, acoples y estructura, sobrecalentando el motor y reductor principal, aumentando los riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones graves al personal. También, se debilitan los ciemientos, comprometiendo la estabilidad estructural. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	2	4	14									
		2	Desalineamiento del cilindro con el eje del molino																
		3	Impactos en la estructura de la carcasa																
		4	Corrosión																
		5	Fatiga de la estructura de la carcasa																
	E	Fractura o deformación en la corona	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Desalineamiento de la corona con el piñón y distribución desigual de la carga sobre los dientes, provocando desgaste prematuro de la corona y piñón, lo que resulta en una disminución de la transmisión de potencia al tambor.	Vibraciones excesivas y cargas adicionales que provocan desgaste prematuro y desalineamiento en ejes, acoples, rodamientos del piñón y principales, generando desequilibrio y aumento de tensión en la estructura de la carcasa, ocasionándole desgaste, deformación o fisuras, que origina fugas de pulpa y corrosión. Se elevan las temperaturas activando las alarmas. Disminución de la eficiencia de molienda y calidad del producto.	Las fugas afectan levemente la seguridad del personal, pero gravemente la estructura por corrosión. Se detiene el molino para reparación y cambio de la corona, piñón, placas, rodamientos, ejes y el alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de la corona, piñón, rodamientos, ejes, estructura y acoples, sobrecalentando el motor y reductor principal, aumentando los riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones graves al personal. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	2	3	9								
			2	Desalineamiento de la corona con el piñón															
			3	Impactos en la corona															
			4	Fatiga de la estructura de la corona															
			5	Corrosión															
	A	Desgaste, deformación o fractura de dientes del piñón	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Disminución de la eficiencia de transmisión de la potencia mecánica a la corona. Distribución desigual de carga sobre los dientes, provocando desgaste prematuro en el piñón y corona, aumentando la carga sobre sus rodamientos y generando vibraciones altas, afectando los ejes y acoples.	Disminución de la eficiencia, capacidad de molienda y calidad del producto. Aumento de la carga sobre los rodamientos principales, acelerando su desgaste, provocando vibraciones excesivas en el molino, que elevan los esfuerzos en la estructura del cilindro. Esto provoca desalineamiento de los rodamientos principales y secundarios, aumentando sus temperaturas, lo que activa las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio del piñón, corona, rodamientos y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico del piñón, corona, rodamientos principales y secundarios, ejes y acoples, sobrecalentando el motor y reductor principal, aumentando riesgos de incendios, daños eléctricos y lesiones graves al personal. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	3	17								
			2	Desalineamiento del piñón con la corona															
3			Lubricación de grasa insuficiente piñón - corona																
4			Fatiga del material del piñón por carga cíclica																
5			Contaminación del lubricante																
6			Impactos en el piñón por falla en la protección																
B	Alta fricción entre dientes de contacto piñón - corona	1	Acumulación de partículas en el piñón	Incremento de temperatura en la zona de contacto, provocando un desgaste acelerado y deformación en los dientes, lo que genera partículas metálicas finas que pueden contaminar el lubricante, resultando en aumento de vibraciones y disminución de la eficiencia de transmisión de potencia mecánica.	Vibraciones excesivas y cargas adicionales que provocan desgaste prematuro en ejes, rodamientos del piñón y rodamientos principales, causando desalineamiento de los rodamientos, generando un desequilibrio y aumento de tensión de la estructura de la carcasa, ocasionando desgaste, deformación o fisuras en ella, lo que origina fugas de pulpa, corrosión y pérdida de soporte para la corona. Se elevan las temperaturas en rodamientos activando las alarmas. Disminuye la eficiencia y calidad del producto.	Las fugas afectan levemente la seguridad del personal, pero gravemente la estructura por corrosión. Se detiene el molino para reparación y cambio del piñón, corona, placas, rodamientos, ejes y el alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de engranajes, rodamientos, ejes, acoples y estructura, sobrecalentando el motor y reductor principal, aumentando riesgos de incendios, daños eléctricos y lesiones graves al personal. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	3	17									
		2	Lubricación de grasa insuficiente piñón - corona																
		3	Contaminación del lubricante																
		4	Desalineamiento del piñón con la corona																
		5	Desgaste, deformación o fractura de los dientes del piñón																
C	Desalineamiento de la corona con el piñón	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Aumento de fricción entre el piñón y la corona, elevando la temperatura en zona de contacto, resultando en desgaste prematuro de los dientes y deformación, contaminando el lubricante, aumentando ruidos y vibraciones, disminuyendo la eficiencia de transmisión.	Vibraciones y cargas excesivas que provocan desgaste prematuro en ejes, rodamientos del piñón y principales, causando desalineamiento de rodamientos y acoples, generando desequilibrio y aumento de tensión en la estructura de la carcasa, ocasionándole desgaste, deformación o fisuras, que origina fugas de pulpa y corrosión. Se elevan las temperaturas activando las alarmas. Pérdida de eficiencia de molienda y calidad del producto.	Las fugas afectan levemente la seguridad del personal, pero gravemente la estructura por corrosión. Se detiene el molino para reparación y cambio del piñón, corona, placas, rodamientos, ejes y el alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de engranajes, rodamientos, ejes, acoples y estructura, sobrecalentando el motor y reductor principal, aumentando riesgos de incendios, daños eléctricos y lesiones graves al personal. Esto conllevaría a una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	3	13									
		2	Desgaste, deformación o fractura de los dientes o estructura de la corona																
		3	Impactos en la corona																
		4	Desbalanceo del molino																
D	Desgaste en rodamientos del eje del piñón	1	Desalineamiento entre el eje y rodamientos	Fricción entre las superficies de contacto del rodamiento, generando calor, vibraciones y ruidos anormales, aumentando la temperatura en el eje, disminuyendo la capacidad de soportar cargas y transmitir energía.	Vibraciones excesivas que provocan desgaste prematuro, deformación, desalineamiento y fractura en acoples, ejes, engranajes, rodamientos del piñón y principales, aumentando el consumo de energía, implicando altos costos operativos y elevando las temperaturas hasta activar las alarmas. Disminución de la eficiencia de molienda y calidad del producto.	Se detiene el molino para reparación y cambio de los rodamientos, piñón, corona y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos, engranajes, ejes y acoples, sobrecalentando el motor y reductor principal, aumentando los riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	2	12									
		2	Lubricación insuficiente en rodamientos																
		3	Sobrecarga de alimentación en el molino																
		4	Ingreso de partículas contaminantes al rodamiento																

Figura 6.30: Diagrama FMECA del molino SAG, parte 6. Elaboración propia.

10	Rodamientos del piñón	Brindarle soporte y permitir la rotación suave del eje del piñón, manejando cargas radiales y axiales	1	A	Desgaste, deformación o fractura en rodamientos	1	Fricción entre componentes internos del rodamiento	Fricción del rodamiento con el eje, provocando desgaste en las zonas de contacto, produciendo calor lo que genera holgura, disminuyendo total o parcialmente la capacidad del rodamiento de soportar el eje. Aumento de las vibraciones en los rodamientos, causando desalineamiento y fugas de lubricante a través de las fracturas.	Vibraciones excesivas y cargas adicionales que provocan el desalineamiento y la deformación en acoples de unión al reductor, de ejes y dientes de los engranajes. Disminuye la eficiencia de transmisión de la potencia, por ende, se reduce la capacidad, eficiencia de molienda y la calidad del producto. Esto genera desequilibrio y aumento de tensión en la estructura del molino, ocasionando desgaste, deformación o fisuras, que origina fugas de pulpa y corrosión. En conjunto, se elevan las temperaturas y vibraciones, activando las alarmas.	Las fugas de pulpa y lubricante afectan levemente la seguridad del personal, pero aumentan los riesgos de incendio y afectan gravemente la estructura por corrosión. Se detiene el molino para reparación y cambio de los rodamientos, piñón, corona, placas, ejes, acoples y el alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos del piñón y principales, engranajes, ejes, reductor, motor y acoples, con altos riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	3	13
						2	Desalineamiento entre el eje y rodamientos							
						3	Desalineamiento entre componentes internos del rodamiento							
						4	Lubricación insuficiente en rodamientos							
						5	Sobrecarga de alimentación en el molino							
						6	Ingreso de partículas contaminantes al rodamiento							
						7	Fatiga del material del rodamiento por carga cíclica							
						8	Impactos en rodamientos o eje							
			2	A	Desgaste o deformación en rodamientos	1	Fricción entre componentes internos del rodamiento	Disminuye la capacidad rotacional del rodamiento debido a la alta fricción, reduciendo la eficiencia de transmisión de potencia hacia los engranajes. Aumento de temperatura en los rodamientos y ejes, provocando deformación e incremento de las vibraciones, ocasionando desalineamiento de los rodamientos, en acoples de los ejes con el reductor y entre los engranajes.	Desgaste prematuro, deformación o fractura en los dientes de los engranajes, acoples y ejes, debido al aumento de la fricción por el desalineamiento. Se producen vibraciones excesivas y cargas adicionales que afectan la transmisión hacia el reductor, motor, los rodamientos mismos del piñón y los principales, provocando sobrecalentamiento y desalineamiento, lo que activa las alarmas de temperatura y posición. Se pueden presentar fugas de lubricante en los rodamientos si el daño se extiende y se forman fisuras. Disminuye la eficiencia de molienda y calidad del producto.	Las fugas de lubricante afectan levemente la seguridad del personal, aunque aumentan los riesgos de incendio. Se detiene el molino para reparación y cambio de los rodamientos del piñón y principales, piñón, corona, ejes, acoples, reductor, motor y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos del piñón y principales, engranajes, ejes, reductor, motor y acoples, con altos riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	2	8
						2	Desalineamiento entre el eje y rodamientos							
						3	Desalineamiento entre componentes internos del rodamiento							
						4	Lubricación insuficiente en rodamientos							
	5	Sobrecarga de alimentación en el molino												
	6	Ingreso de partículas contaminantes al rodamiento												
	7	Fatiga del material del rodamiento por carga cíclica												
	8	Impactos en rodamientos o eje												
	B	Desalineamiento de los rodamientos con el eje del piñón	Fricción y distribución desigual de la carga, resultando en desgaste prematuro e irregular y deformación en los rodamientos y ejes del piñón, presentando vibraciones, aumento de temperatura, ruidos anormales y fugas leves de lubricante, disminuyendo la eficiencia de transmisión.	1	Desgaste en los rodamientos o eje	Vibraciones excesivas que afectan a los engranajes, ejes, acoples, al reductor y motor, aumentando el desgaste, produciendo deformación y fracturas. También, éstas inciden en la estabilidad del molino, influyendo en los rodamientos principales, provocando desgaste prematuro, lo que aumenta la fricción y temperaturas, activando las alarmas, resultando en disminución de la eficiencia de molienda y calidad del producto, incrementando el consumo energético.	Las fugas de lubricante afectan levemente la seguridad del personal, aumentando riesgos de incendio. Se detiene el molino para reparación y cambio de rodamientos del piñón y principales, engranajes, ejes, acoples, reductor, motor y alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento y pérdidas de producción por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos del piñón y principales, engranajes, ejes, reductor, motor y acoples, con altos riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	2	2	5			
				2	Impactos en el molino									
				3	Vibraciones excesivas del molino									
				4	Sobrecarga de alimentación en el molino									
	1	A	Desgaste, deformación o fractura en rodamientos	1	1	Fricción entre componentes internos del rodamiento	Fricción del rodamiento con el muñón, provocando desgaste en las zonas de contacto, produciendo calor lo que genera holgura, disminuyendo total o parcialmente la capacidad del rodamiento de soportar el muñón y con ello el cilindro. Aumento de las vibraciones en los rodamientos, causando desalineamiento y fugas de lubricante a través de las fracturas.	Vibraciones excesivas y cargas adicionales que provocan el desalineamiento, deformación y desgaste prematuro en los engranajes, acoples, ejes, rodamientos del reductor, motor y piñón. Disminuye la eficiencia de transmisión de la potencia, por ende, se reduce la capacidad, eficiencia de molienda y la calidad del producto. Esto genera desequilibrio, aumentando el desgaste de los revestimientos e incrementando la tensión en la estructura del molino, causando desgaste, deformación o fisuras, que origina fugas de pulpa y corrosión. En conjunto, se elevan las temperaturas y vibraciones, activando las alarmas.	Las fugas de pulpa y lubricante afectan levemente la seguridad del personal, pero aumentan los riesgos de incendio y afectan gravemente la estructura por corrosión. Se detiene el molino para reparación y cambio de los rodamientos, piñón, corona, placas, ejes, acoples y el alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos principales, del piñón y motor, engranajes, ejes, reductor, motor y acoples, desplomándose el molino, resultando en altos riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones muy graves o fatales al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	4	18	
					2	Desalineamiento entre el eje del molino y rodamientos								
					3	Desalineamiento entre componentes internos del rodamiento								
					4	Lubricación insuficiente en rodamientos								
5					Sobrecarga de alimentación en el molino									
6					Ingreso de partículas contaminantes al rodamiento									
7					Fatiga del material del rodamiento por carga cíclica									
8					Impactos en rodamientos o molino									

Figura 6.31: Diagrama FMECA del molino SAG, parte 7. Elaboración propia.

Molino de bolas	11	Rodamientos principales	K	Otorgar soporte y permitir la rotación del tambor del molino, conectándose a través de los muñones	B	Desalineamiento de los rodamientos con el eje del molino	1	Desgaste o deformación en los rodamientos principales y muñones	Fricción y distribución desigual de la carga, resultando en desgaste prematuro e irregular, deformación o fractura en componentes de los rodamientos y en los muñones, presentando vibraciones, aumento de temperatura, ruidos anormales y fugas leves de lubricante, disminuyendo la estabilidad y capacidad de soporte.	Vibraciones excesivas y cargas adicionales que provocan desgaste prematuro y deformación en engranajes, acoples, ejes, reductor y rodamientos secundarios. Disminuye la eficiencia de transmisión, requiriendo mayor esfuerzo del motor, aumentando el consumo energético, reduciendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Esto genera desequilibrio, aumentando el desgaste de los revestimientos e incrementando la tensión en la estructura del molino, causando desgaste, deformación o fisuras, que origina fugas de pulpa y corrosión. En conjunto, se elevan las temperaturas y vibraciones, activando las alarmas.	Las fugas de pulpa afectan levemente la seguridad del personal y la zona afectada. Se detiene el molino para reparación y cambio de rodamientos principales y secundarios, engranajes, ejes, acoples, reductor, motor y alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos principales, del piñón y motor, engranajes, ejes, reductor, motor y acoples, desplazándose el molino, resultando en altos riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones muy graves o fatales al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	4	18
							2	Impactos en el molino							
							3	Vibraciones excesivas debido a desgaste de los revestimientos o desbalanceo del molino							
							4	Sobrecarga de alimentación en el molino							
							5	Bastidores de los rodamientos sueltos							
					A	Desgaste, deformación o fractura en rodamientos	1	Fricción entre componentes internos del rodamiento	Fricción que disminuye la capacidad rotacional de los rodamientos, produciendo partículas que contaminan el lubricante, aumentando la temperatura en los rodamientos y muñones, provocando deformación e incremento de ruidos anormales y vibraciones, ocasionando desalineamiento o sultura de los rodamientos con el bastidor.	Vibraciones excesivas y cargas adicionales que provocan el desalineamiento, deformación y desgaste prematuro en los engranajes, acoples, ejes, rodamientos del motor, reductor y piñón. Disminuye la eficiencia de transmisión de la potencia, por ende, se reduce la capacidad, eficiencia de molienda y la calidad del producto. Esto genera desequilibrio, aumentando el desgaste de los revestimientos e incrementando la tensión en la estructura del molino, causando desgaste, deformación o fisuras, que origina fugas de pulpa y corrosión. En conjunto, se elevan las temperaturas y vibraciones, activando las alarmas.	Las fugas de pulpa y lubricante afectan levemente la seguridad del personal, pero aumentan los riesgos de incendio y afectan gravemente la estructura por corrosión a largo plazo. Se detiene el molino para reparación y cambio de los rodamientos, piñón, corona, placas, ejes, acoples, revestimientos y el alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos principales, del piñón y motor, engranajes, ejes, reductor, motor, revestimientos y daños eléctricos y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	4	18
							2	Desalineamiento entre el eje del molino y rodamientos							
							3	Desalineamiento entre componentes internos del rodamiento							
							4	Lubricación insuficiente en rodamientos							
							5	Sobrecarga de alimentación en el molino							
							6	Ingreso de partículas contaminantes al rodamiento							
							7	Fatiga del material del rodamiento por carga cíclica							
							8	Impactos en rodamientos o molino							
					B	Lubricación insuficiente en rodamientos	1	Bajo nivel de grasa	Desgaste prematuro en rodillos y pistas de rodadura, resultando en deformación de estas superficies, distribuyendo de forma desigual la carga en rodillos y pista, aumentando la fricción y temperatura, generando partículas de acero que aumentan el daño.	Vibraciones y cargas excesivas que provocan grietas en rodamientos, desalineación interna y con el muñón, desgaste, desalineación y deformación en engranajes, ejes, rodamientos secundarios y acoples. Disminuye eficiencia de molienda y calidad del producto. Aumenta el desgaste en revestimientos y tensión en estructura, causando deformación o fisuras, fugas y corrosión. En conjunto, se elevan las temperaturas y vibraciones, activando las alarmas.	Las fugas de pulpa afectan levemente la seguridad del personal y la zona. Se detiene el molino para reparación y cambio de rodamientos principales y secundarios, engranajes, ejes, acoples, placas, revestimientos y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos principales, del piñón y motor, engranajes, ejes, reductor, motor, revestimientos y daños eléctricos y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	4	21
							2	Contaminación del lubricante							
3	Sobrecalentamiento de los rodamientos														
4	Obstrucción en los conductos de lubricación														
5	Desgaste en bombas de lubricación														
C	Desalineamiento entre pistas de rodadura y los elementos rodantes	1	Cargas desiguales o sobrecarga de alimentación	Fricción y distribución desigual de la carga, resultando en desgaste prematuro e irregular, deformación o fractura en pistas de rodadura, rodillos, sellos y juntas, aumentando la holgura presentando vibraciones, aumento de temperatura, ruidos anormales y fugas leves de lubricante, que disminuye la capacidad rotacional.	Vibraciones y cargas excesivas que provocan desalineamiento, deformación y desgaste prematuro en engranajes, acoples, ejes, reductor y rodamientos secundarios. Disminuye la eficiencia de transmisión, requiriendo mayor esfuerzo del motor y consumo energético, reduciendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Aumenta el desgaste de revestimientos y tensión estructural, causando desgaste, deformación o fisuras, que origina fugas y corrosión. En conjunto, se elevan las temperaturas y vibraciones, activando las alarmas.	Las fugas de pulpa y lubricante afectan levemente la seguridad del personal, aumentan los riesgos de incendio y la estructura por corrosión. Se detiene el molino para reparación y cambio de rodamientos, engranajes, placas, acoples, revestimientos, ejes y alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos principales, del piñón y motor, engranajes, ejes, reductor, motor, revestimientos y daños eléctricos y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	2	3	9					
		2	Desgaste, deformación o fractura en rodamientos												
		3	Flexión o deformación en los muñones o cilindro por sobrecarga												
		4	Vibraciones excesivas												
		5	Desalineamiento entre el eje del molino y rodamientos												
A	Desgaste, deformación o fractura del soporte de alojamiento del rodamiento	1	Desalineamiento del molino y con los bastidor, disminuyendo la capacidad de soporte, lo que aumenta las vibraciones, fricción y carga desigual en rodamiento, acelerando el desgaste de las superficies en contacto, provocando desalineamiento interno del rodamiento y con el bastidor.	Holgura entre el rodamiento y el bastidor, disminuyendo la capacidad de soporte, lo que aumenta las vibraciones, fricción y carga desigual en rodamiento, acelerando el desgaste de las superficies en contacto, provocando desalineamiento interno del rodamiento y con el bastidor.	Vibraciones excesivas y cargas desiguales que provocan desgaste, fatiga, deformación, fractura o desalineamiento de las pistas de rodaduras con los rodillos y del rodamiento con el muñón, presentando fugas de lubricante, lo que aumenta la generación de calor, activando las alarmas de los rodamientos. Aumenta el consumo energético, disminuye la eficiencia de molienda y calidad del producto.	Las fugas de lubricante afectan levemente la seguridad del personal, aumentando riesgos de incendio. Se detiene el molino para reparación y cambio de rodamientos, bastidores y muñones, implicando costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de los bastidores, rodamientos principales y muñones, desplazándose el molino, resultando en daños eléctricos y lesiones muy graves o fatales al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	2	5	19					
		2	Fatiga del material por carga cíclica												
		3	Sobrecarga de alimentación del molino												
		4	Impactos en el molino												
		5	Corrosión												

Figura 6.32: Diagrama FMECA del molino SAG, parte 8. Elaboración propia.

12	Bastidores de rodamientos principales	L	Proveer soporte y posicionar los rodamientos, limitando el movimiento radial y axial	2	No mantiene la posición establecida	A	Pernos de sujeción de los bastidores rotos o sueltos	1	Tensión aplicada insuficiente	Desplazamiento gradual de la estructura, no manteniendo la posición establecida, lo que aumenta las vibraciones del molino, provoca cargas desiguales en el bastidor que causan desgaste, deformación o incluso fractura, afectando el soporte del rodamiento, que ocasiona holgura y disminuye la capacidad de soporte.	Vibraciones excesivas y cargas desiguales que provocan desbalanceo del molino, aumentando el desgaste de las bolas y revestimientos, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se genera desgaste, fatiga, deformación, fractura y desalineamiento en rodamientos, engranajes, ejes, reductor, motor y tensión en la estructura, presentando fugas de pulpa y lubricante, lo que aumenta la generación de calor, activando las alarmas.	Las fugas de pulpa y lubricante afectan levemente la seguridad del personal, aumentan los riesgos de incendio y corrosión estructural. Se detiene el molino para reparación y cambio de bastidores, rodamientos, engranajes, placas, revestimientos, ejes y el alineamiento de componentes, implicando pérdida de material, costos por mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de los bastidores, rodamientos principales, ejes, reductor, motor, revestimientos y engranajes, desplomándose el molino, resultando en daños eléctricos y lesiones muy graves o fatales al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	4	21								
								2	Vibraciones excesivas															
								3	Desgaste o deformación de los pernos															
								4	Corrosión															
								5	Distribución de carga irregular en los pernos por desalineamiento o desbalanceo del molino															
					2	No mantiene la posición establecida	B	Desalineamiento del bastidor con el rodamiento o con el eje del molino	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Fricción y distribución desigual de la carga, resultando en desgaste, deformación o fractura en las superficies del bastidor, rodamientos y muñones, presentando vibraciones, aumento de temperatura, ruidos anormales y fugas de lubricante, disminuyendo la estabilidad, no manteniendo la posición establecida.	Vibraciones excesivas y cargas desiguales que provocan desgaste, fatiga, deformación, fractura y desalineamiento en rodamientos, engranajes, ejes, reductor, motor y tensión en la estructura, presentando fugas de pulpa y lubricante, lo que aumenta la generación de calor, activando las alarmas. Se genera desbalanceo del molino, incrementando el desgaste de bolas y revestimientos, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto.	Las fugas de pulpa y lubricante afectan levemente la seguridad del personal, aumentan los riesgos de incendio y corrosión estructural. Se detiene el molino para reparación y cambio de bastidores, rodamientos, engranajes, placas, revestimientos, ejes, reductor, motor y el alineamiento de componentes, implicando pérdidas de material, costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico de los bastidores, rodamientos principales, ejes, reductor, motor, revestimientos y engranajes, desplomándose el molino, resultando en daños eléctricos y lesiones muy graves o fatales al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	5	22							
									2	Desgaste o deformación del rodamiento o del eje del molino														
									3	Impactos en el molino														
									4	Vibraciones excesivas														
									5	Lubricación insuficiente de los rodamientos														
				1	No transforma la energía o entrega menor potencia	A	Baja tensión eléctrica	1	Fluctuaciones en la red eléctrica	Aumento de la corriente eléctrica del motor, elevando su temperatura, provocando daños internos en devanados, rotor y estator, disminuyendo el rendimiento, velocidad de giro y el par transmitido.	Aumento de carga en reductor auxiliar, causando desgaste, deformación o fractura en sus engranajes, aumentando las vibraciones y carga hacia el reductor de velocidad principal, provocando desgaste, deformación, fractura o desalineamiento de sus componentes, resultando en falta de control de velocidad del giro lento, provocando arranque brusco e impactos, desgastando los revestimientos y bolas, elevando temperaturas y activando las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio del motor y reductor auxiliar, ejes, acoples, reductor principal y revestimientos, costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico del motor y reductor auxiliar, reductor de velocidad principal, ejes, acoples, rodamientos y engranajes, con altos riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de reparación.	3	2	8								
								2	Conexiones eléctricas dañadas															
								B	Daños en los devanados del estator o rotor del motor	1	Sobrecalentamiento debido a carga excesiva en el motor o ventilación insuficiente	Cortocircuito en devanados, elevando la temperatura, provocando pérdida de la eficiencia en conversión de energía, disminuyendo la velocidad de giro y par transmitido.	Aumento de carga en reductor auxiliar, causando desgaste, deformación o fractura en sus engranajes, aumentando las vibraciones y carga hacia el reductor de velocidad principal, provocando desgaste, deformación, fractura o desalineamiento de sus componentes, resultando en falta de control de velocidad del giro lento, provocando arranque brusco e impactos, desgastando los revestimientos y bolas, elevando temperaturas y activando las alarmas.	Riesgo de incendio del motor afectando gravemente la seguridad. Se detiene el molino para reparación y cambio del motor y reductor auxiliar, ejes, acoples, reductor principal y revestimientos, costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico del motor y reductor auxiliar, reductor de velocidad principal, ejes, acoples, rodamientos y engranajes, con altos riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de reparación.	2	4	14						
										2	Fluctuaciones en la red eléctrica													
								13	Motor de accionamiento auxiliar	M	Transformar la energía eléctrica en energía mecánica rotacional	1	No transforma la energía o entrega menor potencia	C	Falla en el variador de frecuencia del motor	1	Fluctuaciones en la red eléctrica	Pérdida total o parcial del control de velocidad de giro y fluctuaciones en el voltaje, causando un funcionamiento fuera de las especificaciones de diseño, provocando desgaste prematuro en componentes internos del motor, rodamientos y eje, elevando sus temperaturas y vibraciones.	Aumento de carga en reductor auxiliar, causando desgaste, deformación o fractura en sus engranajes, aumentando las vibraciones y carga hacia el reductor de velocidad principal, provocando desgaste, deformación, fractura o desalineamiento de sus componentes, resultando en falta de control de velocidad del giro lento, provocando arranque brusco e impactos, desgastando los revestimientos y bolas, elevando temperaturas y activando las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio del motor y reductor auxiliar, ejes, acoples, reductor principal y revestimientos, costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico del motor y reductor auxiliar, reductor de velocidad principal, ejes, acoples, rodamientos y engranajes, con altos riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de reparación.	3	3	13
																2	Desgaste y envejecimiento de los componentes internos del VDF							
3	Sobrecalentamiento por ventilación insuficiente																							

Figura 6.33: Diagrama FMECA del molino SAG, parte 9. Elaboración propia.

	D	Desgaste de los rodamientos del eje del motor	1	Lubricación insuficiente de los rodamientos	Fricción entre superficies en contacto del rodamiento, generando calor, vibraciones y ruidos, elevando la temperatura en el eje, provocándole desgaste o deformación, disminuyendo su capacidad de soportar cargas, lo que aumenta las vibraciones en motor, reduciendo su eficiencia, transmisión y velocidad de giro.	Aumento de carga en reductor auxiliar, causando desgaste, deformación o fractura en sus engranajes, aumentando las vibraciones y carga hacia el reductor de velocidad principal, provocando desgaste, deformación, fractura o desalineamiento de sus componentes, resultando en falta de control de velocidad del giro lento, provocando arranque brusco e impactos, desgastando los revestimientos y bolas, lo que incrementa el consumo energético. Se elevan las temperaturas, activando las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio del motor y reductor auxiliar, ejes, acoples, reductor principal y revestimientos, costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico del motor y reductor auxiliar, reductor de velocidad principal, ejes, acoples, rodamientos y engranajes, con altos riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de reparación.	2	2	5	
			2	Ingreso de partículas contaminantes al rodamiento								
			3	Sobrecarga de alimentación en el molino								
			4	Desalineamiento entre el eje del motor y el eje del piñón								
	E	Desalineamiento del eje del motor con el reductor de velocidad	1	Impactos en el motor o reductor	Carga desigual que genera desgaste, deformación, fractura o desalineación de rodamientos del motor, rodamientos, ejes y engranajes del reductor, y acoples, elevando la fricción, lo que aumenta vibraciones, ruido y temperaturas, reduciendo la velocidad de giro y potencia.	Aumento de carga en reductor auxiliar, causando desgaste, deformación o fractura en sus engranajes, aumentando las vibraciones y carga hacia el reductor de velocidad principal, provocando desgaste, deformación, fractura o desalineamiento de sus componentes, resultando en falta de control de velocidad del giro lento, provocando arranque brusco e impactos, desgastando los revestimientos y bolas, lo que incrementa el consumo energético. Se elevan las temperaturas, activando las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio del motor y reductor auxiliar, ejes, acoples, reductor principal y revestimientos, costos de mantenimiento y pérdidas por inactividad.	Colapso catastrófico del motor y reductor auxiliar, reductor de velocidad principal, y acoples, rodamientos y engranajes, con altos riesgos de incendio, daños eléctricos y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad de la planta, pérdidas significativas de producción y costos elevados de reparación.	3	2	8	
			2	Desgaste de los acoplamientos								
			3	Sobrecarga de alimentación en el molino								
			4	Desalineamiento en la estructura del molino								
	A	Desalineamiento de los engranajes	1	Desgaste, deformación o fractura de los dientes de los engranajes	Aumento de fricción y carga desigual, lo que provoca desgaste irregular en los dientes de los engranajes, elevando la temperatura, generando deformación, fracturas de dientes y holgura entre los engranajes, reduciendo la eficiencia de funcionamiento, aumentando las vibraciones y el ruido.	Desgaste prematuro, deformación, fractura o desalineamiento en reductor principal, produciéndose pérdida del control de la velocidad de giro del molino, ocasionando arranques bruscos o paradas repentinas, provocando sobrecarga en el motor auxiliar, impactos en el molino, desgaste de los revestimientos y tensión estructural, afectando los rodamientos principales y secundarios, incrementando su desgaste y elevando su temperatura hasta activar las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio en reductores, motor, ejes, acoples, revestimientos, estructura del molino y rodamientos, implicando pérdidas por inactividad y costos de mantenimiento.	Colapso catastrófico de reductores, motor, ejes, acoples y rodamientos con alto riesgo de incendio, daños eléctricos y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	2	8	
			2	Impactos en el reductor								
			3	Sobrecarga de alimentación del molino								
			4	Vibraciones excesivas del molino								
5			Desalineamiento del eje de transmisión									
B	Desgaste, deformación o fractura de los dientes de los engranajes	1	Sobrecarga de alimentación del molino	Holgura entre los dientes de los engranajes, lo que reduce la eficiencia de funcionamiento del reductor, provocando pérdida del control de la velocidad de giro y torque del molino, ocasionando vibraciones y ruidos anormales.	Desgaste prematuro, deformación, fractura o desalineamiento en reductor principal, ocasionando arranques bruscos del molino, provocando sobrecarga en el motor auxiliar, impactos en el molino, desgaste de los revestimientos y tensión estructural, afectando los rodamientos principales y secundarios, incrementando su desgaste y elevando su temperatura hasta activar las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio en reductores, motor, ejes, acoples, revestimientos, estructura del molino y rodamientos, implicando pérdidas por inactividad y costos de mantenimiento.	Colapso catastrófico de reductores, motor, ejes, acoples y rodamientos con alto riesgo de incendio, daños eléctricos y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	2	8		
		2	Desalineamiento de los engranajes									
		3	Lubricación insuficiente de los engranajes									
		4	Contaminación del lubricante									
		5	Fatiga en los engranajes por carga cíclica									
		6	Impactos en el reductor									
C	Acoplamiento del giro lento desgastado o desalineado	1	Vibraciones excesivas en el sistema de transmisión	Fuerzas desiguales en el acople, ocasionando deformación y desgaste en ejes, discos, rodamientos y componentes del reductor principal, reduciendo la capacidad de transmisión del torque y velocidad de giro eficientemente, generando cargas adicionales en el reductor auxiliar que producen desgaste prematuro en sus engranajes, vibraciones y ruidos anormales.	Se propaga el desalineamiento al eje del piñón, aumentando el desgaste en sus rodamientos, lo que provoca arranques bruscos del molino, generando sobrecarga en el motor auxiliar, impactos en el molino, desgaste de los revestimientos y tensión estructural, afectando los rodamientos principales, incrementando su desgaste y elevando su temperatura hasta activar las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio de acoples, reductores, motor, ejes, revestimientos, estructura del molino y rodamientos, implicando pérdidas por inactividad y costos de mantenimiento.	Colapso catastrófico de los acoples, reductores, motor, ejes y rodamientos con alto riesgo de incendio, daños eléctricos y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	1	7		
		2	Desgaste desigual del acople									
		3	Sobrecarga de alimentación del molino									
		4	Impactos en el reductor									
		5	Fricción de los discos del acople									
		6	Desgaste o deformación en el eje del reductor y piñón									
14	Reductor de velocidad auxiliar	N	Reducir la velocidad y aumentar el torque proveniente del motor auxiliar para transmitirlo al reductor de velocidad principal	1	No reduce la velocidad de giro a la requerida							

Figura 6.34: Diagrama FMECA del molino SAG, parte 10. Elaboración propia.

15	Conducto o pitón de alimentación	Facilitar el flujo de material hacia el interior del tambor del molino para su molienda	1	No fluye fácilmente el material hacia el interior del molino	A	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Fugas de material a través de las aberturas que provocan corrosión en la estructura y una alimentación irregular hacia el interior del molino, causando desequilibrio en la carga lo que aumenta las vibraciones, provocando desalineamiento del pitón, exponiendo el sello de alimentación a abrasión y desgaste.	Dado el desequilibrio y pérdida de carga de alimentación, se produce un desgaste prematuro en los revestimientos y bolas de acero, aumenta la tensión estructural del molino, provocando vibraciones excesivas que afecta a los rodamientos principales y engranajes, incrementando su desgaste y fricción, lo que eleva sus temperaturas activando las alarmas. Disminución de la eficiencia de molienda y capacidad operativa del molino, resultando en una menor calidad del producto y menor producción.	Las fugas de material afectan gravemente la seguridad del personal y el área del derrame. Se detiene el molino para reparación y cambio del pitón, revestimientos, rodamientos y engranajes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico del pitón, sello de alimentación, revestimientos, engranajes, rodamientos y carcasa, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	4	21
						2	Impactos en la estructura del pitón							
						3	Abrasión de la estructura interna debido al material							
						4	Fatiga del pitón por carga cíclica							
						5	Desgaste del revestimiento del pitón							
						6	Vibraciones excesivas							
						7	Corrosión							
					B	1	Abrasión del sello debido al paso de material	Pérdida de la capacidad de contener el flujo de material, presentando fugas de material o ingreso de contaminantes al molino, provocando abrasión y desgaste en el pitón, disminuyendo la eficiencia de alimentación.	Desequilibrio en la distribución de carga en la alimentación, generando desbalanceo en los revestimientos y bolas de acero, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se producen vibraciones excesivas, afectando la tensión estructural, los rodamientos y engranajes, incrementando su desgaste y el riesgo de desalineamiento, lo que eleva sus temperaturas activando las alarmas.	Las fugas de material afectan gravemente la seguridad del personal y el área del derrame. Se detiene el molino para reparación y cambio del sello, pitón, revestimientos, rodamientos y engranajes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico del sello, pitón, revestimientos, rodamientos, engranajes y carcasa, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	3	17
						2	Impactos en el sello							
						3	Desalineamiento del conducto con el sello y muñón							
						4	Sobrecarga de alimentación en el molino							
						5	Falta de limpieza o purga							
					C	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Ajuste deficiente entre el ducto y el muñón, provocando fricción excesiva y cargas desiguales que aumentan la presión localizada, conduciendo a un desgaste prematuro o deformación en el pitón, muñón y sello de alimentación, presentando fugas de material y abrasión.	Desbalanceo en el molino, generando aumento del desgaste de los revestimientos y bolas, lo que produce vibraciones excesivas que se propagan a los rodamientos y engranajes, provocando fricción y desgaste, aumentando sus temperaturas hasta activar las alarmas, resultando en una disminución de la eficiencia de molienda y calidad del producto.	Fuga significativa de material que afecta gravemente la seguridad del personal y la zona afectada. Se detiene el molino para reparación y cambio del sello, pitón, muñón, revestimientos, rodamientos y engranajes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico del sello, pitón, revestimientos, rodamientos, engranajes y muñones, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	3	13
						2	Impactos en el conducto de alimentación							
						3	Desgaste del pitón o del muñón en la unión							
4	Vibraciones excesivas debido a desgaste de los revestimientos o desbalanceo del molino													
5	Pernos de sujeción de la unión sueltos o rotos													
6	Desalineamiento del molino													
D	1	Sobrecarga o aumento del tamaño de carga de alimentación en el molino	Bloqueo gradual del flujo de alimentación, disminuyendo la capacidad de producción, aumentando la presión y carga interna, dañando el sello, muñón y el conducto de alimentación, provocando deformaciones, desgaste y desalineamiento, resultando en fugas de material.	Desbalanceo y vibraciones excesivas que aumentan el desgaste en rodamientos principales y revestimientos, e incrementan la carga en engranajes, reductor y motor, causando mayor consumo energético, desgaste en rodamientos del piñón, motor y dientes de engranajes, reduciendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se genera fricción, elevando sus temperaturas, con sobrecalentamiento en el motor, lo que activa indicadores y alarmas.	Las fugas afectan gravemente la seguridad del personal y el área del derrame. Se detiene el molino para reparación y cambio del sello, pitón, muñones, rodamientos, engranajes, revestimientos, reductor y motor, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico del sello de alimentación, pitón, muñones, rodamientos, reductor, motor, revestimientos y engranajes, desplomándose el molino, con alto riesgo de incendio, daños eléctricos y lesiones graves o fatales al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	4	21					
	2	Desgaste, deformación o rotura del revestimiento del pitón												
	3	Deformación de la estructura del pitón												
1	No logra soportar el pitón		1	No logra soportar el pitón	A	1	Corrosión	Desalineamiento o soltura del conducto de alimentación con el chute, provocando obstrucciones en el flujo de material que va desgastando, deformando o agrietando el ducto y sello, y fugas de material que desgasta la estructura, lo que compromete la capacidad del chute para sostener el pitón y va generando desgaste o deformación en el chute.	Desbalanceo y vibraciones excesivas en el molino que aumentan el desgaste en rodamientos principales y revestimientos, e incrementan la carga en engranajes, reductor y motor principal, causando mayor consumo energético, desgaste en rodamientos del piñón, motor y en dientes de engranajes, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se genera fricción en estos componentes, elevando sus temperaturas, con sobrecalentamiento en el motor, lo que activa los indicadores y alarmas.	Las fugas de material afectan gravemente la seguridad del personal y el área del derrame. Se detiene el molino para reparación y cambio del pitón, soporte de la junta, chute, revestimientos, sello, rodamientos, reductor, motor y engranajes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico del pitón, sello, chute, rodamientos, revestimientos, reductor, motor y engranajes, con alto riesgo de incendio, daños eléctricos y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	4	18
						2	Desalineamiento del chute con el pitón							
						3	Sobrecarga de alimentación en el molino							
						4	Fatiga del material de la unión por carga cíclica							
						5	Impactos en el chute							
						6	Acumulación de polvo o partículas abrasivas en las uniones							

Figura 6.35: Diagrama FMECA del molino SAG, parte 11. Elaboración propia.

Alimentación y descarga

IV

16	Chute de alimentación	O	Dirigir el flujo de 1530 ton/día de material hacia el interior del molino, soportando y posicionando el conducto de alimentación	Z	No mantiene la posición correcta del ducto	A	Desalineamiento del chute con el muñón	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Tensión en el conducto de alimentación, generando su deformación, desalineamiento o desgaste por fricción, provocando vibraciones y obstrucción de material en el ducto, causando agrietamiento, fugas de material y desgaste, deformación o fisuras en el chute, sello y muñón.	Alimentación irregular que provoca desbalanceo y vibraciones excesivas en el molino que aumentan el desgaste en rodamientos principales y revestimientos, e incrementan la carga en engranajes, reductor y motor principal, causando mayor consumo energético, desgaste en rodamientos del piñón, motor y en dientes de engranajes, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se genera fricción en estos componentes, elevando sus temperaturas, con sobrecalentamiento en el motor, lo que activa los indicadores y alarmas.	Las fugas de material afectan gravemente la seguridad del personal y el área del derrame. Se detiene el molino para reparación y cambio del pitón, chute, sello, revestimientos, reductor, motor y engranajes, desplomándose el molino, con alto riesgo de incendio, daños eléctricos y lesiones graves o fatales al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	3	13
								2	Impactos en el chute de alimentación						
								3	Desgaste o deformación del chute y del muñón						
								4	Vibraciones excesivas debido a desgaste de los revestimientos o desbalanceo del molino						
								5	Deformación de los rieles de montaje						
								6	Fijación inestable de las ruedas del chute						
				B	Pernos de sujeción sueltos o rotos	1	Tensión aplicada insuficiente	Pitón suelto o desalineado, generando fricción con el muñón, aumentando el desgaste prematuro, deformación o fisuras del sello, pitón, chute y muñón, lo que provoca obstrucción de material en el ducto y fugas de material.	Desbalanceo y vibraciones excesivas que aumentan el desgaste en rodamientos principales y revestimientos, la carga en engranajes, reductor y motor, causando mayor consumo energético, desgaste en rodamientos del piñón, motor y dientes de engranajes, disminuyendo eficiencia de molienda y calidad. Se genera fricción, elevando sus temperaturas, activando alarmas.	Las fugas afectan gravemente la seguridad y el área afectada. Se detiene el molino para mantenimiento del pitón, chute, sello, revestimientos, rodamientos, reductor, motor y engranajes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico del pitón, sello, muñones, chute, rodamientos, engranajes, revestimientos, reductor, y motor, desplomándose el molino, con alto riesgo de incendio, daños eléctricos y lesiones graves o fatales al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	1	3	6	
						2	Vibraciones excesivas								
						3	Desgaste o deformación de los pernos								
						4	Corrosión								
				A	Perforación, grieta o fractura en la estructura del chute	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Fugas de material a través de las aberturas que provocan daños e interrupción en la movilidad del chute y una alimentación irregular hacia el interior del molino, causando desequilibrio en la carga lo que aumenta las vibraciones, ocasionando desalineamiento del pitón, lo que resulta en desgaste, deformación o fractura en el sello y el muñón.	Desbalanceo y vibraciones excesivas en el molino que aumentan el desgaste en rodamientos principales, revestimientos y bolas de acero, e incrementan la carga en engranajes reductor y motor principal, causando mayor consumo energético, desgaste en rodamientos del piñón, motor y en dientes de engranajes, y tensión estructural, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se genera fricción en estos componentes, elevando sus temperaturas, con sobrecalentamiento en el motor, lo que activa los indicadores y alarmas.	Las fugas de material afectan gravemente la seguridad del personal y el área del derrame. Se detiene el molino para reparación y cambio del pitón, chute, sello, revestimientos, rodamientos, reductor, motor y engranajes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico del pitón, sello, muñones, chute, rodamientos, engranajes, desplomándose el molino, con alto riesgo de incendio, daños eléctricos y lesiones graves o fatales al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	4	18	
						2	Impactos de la carga en el chute								
						3	Abrasión de la estructura interna debido al material								
						4	Fatiga del material del chute por carga cíclica								
						5	Vibraciones excesivas del molino o por desequilibrios en la carga								
						6	Corrosión								
						7	Desgaste del revestimiento del chute								
				B	Desalineamiento del chute con el muñón	1	Sobrecarga de alimentación en el molino	Tensión en el conducto de alimentación, generando su deformación, desalineamiento o desgaste por fricción, provocando vibraciones y obstrucción de material en el ducto, causando agrietamiento, fugas de material y desgaste, deformación o fisuras en el chute, sello y muñón.	Alimentación irregular que provoca desbalanceo y vibraciones excesivas en el molino que aumentan el desgaste en rodamientos principales y revestimientos, e incrementan la carga en engranajes, reductor y motor principal, causando mayor consumo energético, desgaste en rodamientos del piñón, motor y en dientes de engranajes, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se genera fricción en estos componentes, elevando sus temperaturas, con sobrecalentamiento en el motor, lo que activa los indicadores y alarmas.	Las fugas de material afectan gravemente la seguridad del personal y el área del derrame. Se detiene el molino para reparación y cambio del pitón, chute, sello, revestimientos, rodamientos, reductor, motor y engranajes, desplomándose el molino, con alto riesgo de incendio, daños eléctricos y lesiones graves o fatales al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	3	13		
						2	Impactos en el chute de alimentación								
						3	Desgaste o deformación del chute y del muñón								
						4	Vibraciones excesivas debido a desgaste de los revestimientos o desbalanceo del molino								
						5	Deformación de los rieles de montaje								
						6	Fijación inestable de las ruedas del chute								
				C	Desgaste del sello de alimentación	1	Abrasión del sello debido al paso de material	Pérdida de la capacidad de contener el flujo, presentando fugas de material o ingreso de contaminantes al molino, provocando abrasión y desgaste en el pitón y muñón, desalineando el conducto, aumentando el riesgo de deformación o agrietamiento.	Desequilibrio en la distribución de carga en la alimentación, generando desbalanceo en el molino, que aumenta el desgaste en los revestimientos y bolas de acero, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se producen vibraciones excesivas, afectando la tensión estructural, los rodamientos y engranajes, incrementando su desgaste y el riesgo de desalineamiento, lo que eleva sus temperaturas activando las alarmas.	Las fugas de material afectan gravemente la seguridad del personal y el área del derrame. Se detiene el molino para reparación y cambio del sello, pitón, revestimientos, rodamientos y engranajes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.	Colapso catastrófico del sello, pitón, revestimientos, rodamientos, engranajes y carcasa, aumentando los riesgos de incendio y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	3	17	
2	Impactos en el sello														
3	Desalineamiento del conducto con el sello y el muñón														
4	Sobrecarga de alimentación en el molino														
5	Falta de limpieza o purga														

Figura 6.36: Diagrama FMECA del molino SAG, parte 12. Elaboración propia.

17	Revestimientos del muñón de alimentación	P	Proteger y proporcionar la superficie de montaje para los sellos de alimentación	1	No protege la estructura interna del muñón	A	Desgaste o fractura del revestimiento del muñón	1	Desalineamiento del muñón con el revestimiento	Pérdida de protección al muñón, permitiendo la infiltración de material abrasivo y humedad, provocándole desgaste prematuro y corrosión. Además, el daño en el revestimiento, compromete la capacidad de sostener el sello y mantener el sellado hermético, presentando fugas de material o ingreso de contaminantes.	Holgura entre el sello y el conducto de alimentación, presentando desalineamiento, provocando obstrucción de material, lo que causa desequilibrio del flujo de carga, aumentando las vibraciones, generando desalineamiento, aumento de tensión estructural y desgaste en revestimientos del cilindro, bolas, rodamientos, muñón y engranajes, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Esto, eleva sus temperaturas activando las alarmas.	Las fugas de material afectan gravemente la seguridad del personal y el área del derrame. Se detiene el molino para reparación y cambio del revestimiento del muñón, sello, muñón, revestimientos de levante, rodamientos y engranajes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.				3	3	13						
								2	No es capaz de sostener los sellos de alimentación	2	Sobrecarga de alimentación en el molino	Pérdida de la capacidad de contener el flujo de material y mantener el sello hermético, presentando fugas de material o ingreso de contaminantes al molino, provocando abrasión y desgaste en el pitón, disminuyendo la eficiencia de alimentación, generando desalineamiento y obstrucción en el ducto.	Desequilibrio en la distribución de carga en la alimentación, generando desbalanceo en el molino, que aumenta el desgaste en los revestimientos y bolas de acero, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se producen vibraciones excesivas, afectando la tensión estructural, los rodamientos y engranajes, incrementando su desgaste y el riesgo de desalineamiento, lo que eleva sus temperaturas activando las alarmas.	Las fugas de material afectan gravemente la seguridad del personal y el área del derrame. Se detiene el molino para reparación y cambio del sello, pitón, revestimientos, rodamientos y engranajes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.										
				3	Impactos en el revestimiento			A	Desgaste o rotura del sello	1	Desalineamiento del sello con el pitón y el muñón	Pérdida de la capacidad de contener el flujo de material y mantener el sello hermético, presentando fugas de material o ingreso de contaminantes al molino, provocando abrasión y desgaste en el pitón, disminuyendo la eficiencia de alimentación, generando desalineamiento y obstrucción en el ducto.	Desequilibrio en la distribución de carga en la alimentación, generando desbalanceo en el molino, que aumenta el desgaste en los revestimientos y bolas de acero, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se producen vibraciones excesivas, afectando la tensión estructural, los rodamientos y engranajes, incrementando su desgaste y el riesgo de desalineamiento, lo que eleva sus temperaturas activando las alarmas.	Las fugas de material afectan gravemente la seguridad del personal y el área del derrame. Se detiene el molino para reparación y cambio del sello, pitón, revestimientos, rodamientos y engranajes, implicando costos de mantenimiento, pérdidas de material y producción por inactividad.										
										2	Abrasión o fricción continua de la carga en el revestimiento	Pérdida de protección al muñón, permitiendo la infiltración de pulpa en la superficie interior del muñón, provocándole desgaste prematuro y corrosión, lo que va debilitando su estructura, causando holgura con el anillo de retención, y liberando partículas que van contaminando el material, generando irregularidades en la superficie donde puede acumular material y ocasionar obstrucción.	Deformación o agrietamiento del muñón, generando tensiones en la estructura del molino, comprometiendo la capacidad de sostener el rodamiento y provocando una distribución desigual de la carga, aumentando el desgaste de los revestimientos y bolas, además de generar vibraciones excesivas que desgastan los rodamientos y engranajes, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad, incrementando la obstrucción en la descarga, reduciendo la producción, resultando en un mayor tamaño de material que aumenta el desgaste en el anillo y trommel. Se eleva la temperatura en rodamientos activando las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio del revestimiento del muñón, muñón, revestimientos de levante, rodamientos, anillo, trommel y engranajes, implicando costos de producción y pérdida de producción por inactividad.										
										3	Sobrecarga de alimentación en el molino	Pérdida de protección al muñón, permitiendo la infiltración de pulpa en la superficie interior del muñón, provocándole desgaste prematuro y corrosión, lo que va debilitando su estructura, causando holgura con el anillo de retención, y liberando partículas que van contaminando el material, generando irregularidades en la superficie donde puede acumular material y ocasionar obstrucción.	Deformación o agrietamiento del muñón, generando tensiones en la estructura del molino, comprometiendo la capacidad de sostener el rodamiento y provocando una distribución desigual de la carga, aumentando el desgaste de los revestimientos y bolas, además de generar vibraciones excesivas que desgastan los rodamientos y engranajes, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad, incrementando la obstrucción en la descarga, reduciendo la producción, resultando en un mayor tamaño de material que aumenta el desgaste en el anillo y trommel. Se eleva la temperatura en rodamientos activando las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio del revestimiento del muñón, muñón, revestimientos de levante, rodamientos, anillo, trommel y engranajes, implicando costos de producción y pérdida de producción por inactividad.										
										4	Fatiga del revestimiento por carga cíclica													
5	Corrosión																							
19	Revestimiento del muñón de descarga	R	Proteger la superficie interior del muñón	1	No protege la estructura interna del muñón	A	Desgaste o fractura del revestimiento del muñón	1	Desalineamiento del muñón con el revestimiento	Pérdida de protección al muñón, permitiendo la infiltración de pulpa en la superficie interior del muñón, provocándole desgaste prematuro y corrosión, lo que va debilitando su estructura, causando holgura con el anillo de retención, y liberando partículas que van contaminando el material, generando irregularidades en la superficie donde puede acumular material y ocasionar obstrucción.	Sobrecarga en el molino, provocando desequilibrio, aumentando el desgaste de las bolas y revestimientos, causando vibraciones excesivas en rodamientos, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad, elevando su temperatura, activando las alarmas. Desgaste, fractura o deformación en la parilla del trommel, descargando material de gran tamaño y bolas, impactando en el cajón, llegando incluso a falla catastrófica de las bombas.	Se detiene el molino para reparación y cambio del revestimiento del muñón, muñón, revestimientos de levante, rodamientos, anillo, trommel y engranajes, implicando costos de producción y pérdida de producción por inactividad.				3	3	13						
								2	Abrasión o fricción continua de la carga en el revestimiento	Pérdida de protección al muñón, permitiendo la infiltración de pulpa en la superficie interior del muñón, provocándole desgaste prematuro y corrosión, lo que va debilitando su estructura, causando holgura con el anillo de retención, y liberando partículas que van contaminando el material, generando irregularidades en la superficie donde puede acumular material y ocasionar obstrucción.	Sobrecarga en el molino, provocando desequilibrio, aumentando el desgaste de las bolas y revestimientos, causando vibraciones excesivas en rodamientos, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad, elevando su temperatura, activando las alarmas. Desgaste, fractura o deformación en la parilla del trommel, descargando material de gran tamaño y bolas, impactando en el cajón, llegando incluso a falla catastrófica de las bombas.	Se detiene el molino para reparación y cambio del revestimiento del muñón, muñón, revestimientos de levante, rodamientos, anillo, trommel y engranajes, implicando costos de producción y pérdida de producción por inactividad.												
								3	Impactos en el revestimiento	Pérdida de protección al muñón, permitiendo la infiltración de pulpa en la superficie interior del muñón, provocándole desgaste prematuro y corrosión, lo que va debilitando su estructura, causando holgura con el anillo de retención, y liberando partículas que van contaminando el material, generando irregularidades en la superficie donde puede acumular material y ocasionar obstrucción.	Sobrecarga en el molino, provocando desequilibrio, aumentando el desgaste de las bolas y revestimientos, causando vibraciones excesivas en rodamientos, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad, elevando su temperatura, activando las alarmas. Desgaste, fractura o deformación en la parilla del trommel, descargando material de gran tamaño y bolas, impactando en el cajón, llegando incluso a falla catastrófica de las bombas.	Se detiene el molino para reparación y cambio del revestimiento del muñón, muñón, revestimientos de levante, rodamientos, anillo, trommel y engranajes, implicando costos de producción y pérdida de producción por inactividad.												
								4	Sobrecarga de alimentación en el molino	Pérdida de protección al muñón, permitiendo la infiltración de pulpa en la superficie interior del muñón, provocándole desgaste prematuro y corrosión, lo que va debilitando su estructura, causando holgura con el anillo de retención, y liberando partículas que van contaminando el material, generando irregularidades en la superficie donde puede acumular material y ocasionar obstrucción.	Sobrecarga en el molino, provocando desequilibrio, aumentando el desgaste de las bolas y revestimientos, causando vibraciones excesivas en rodamientos, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad, elevando su temperatura, activando las alarmas. Desgaste, fractura o deformación en la parilla del trommel, descargando material de gran tamaño y bolas, impactando en el cajón, llegando incluso a falla catastrófica de las bombas.	Se detiene el molino para reparación y cambio del revestimiento del muñón, muñón, revestimientos de levante, rodamientos, anillo, trommel y engranajes, implicando costos de producción y pérdida de producción por inactividad.												
20	Anillo de retención de bolas	S	Favorecer el paso de la pulpa y retener las bolas de acero	1	No permite el paso de pulpa	A	Acumulación de material en el anillo	1	Sobrecarga de alimentación del molino o tamaño de material y bolas de molienda demasiado grandes	Impedimento del paso libre de pulpa hacia la descarga, aumentando la presión en el anillo, lo que incrementa su desgaste y riesgo de posible deformación o fractura. Se eleva el nivel de material acumulado, permitiendo el paso de bolas y pulpa por el centro del anillo.	Sobrecarga en el molino, provocando desequilibrio, aumentando el desgaste de las bolas y revestimientos, causando vibraciones excesivas en rodamientos, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad, elevando su temperatura, activando las alarmas. Sube el nivel de material acumulado, permitiendo el paso de bolas y pulpa por el centro del anillo, ocasionando desgaste, deformación o fractura en el trommel, descargando material de gran tamaño y bolas, impactando en el cajón, llegando incluso a falla catastrófica de las bombas.	Desbordamiento y sobrecalentamiento del molino, afectando gravemente la seguridad y causando mayor consumo energético. Detención por mantenimiento del anillo, trommel, revestimientos, rodamientos y bombas, implicando altos costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.				4	4	21						
								2	Desgaste, deformación o desajuste del anillo	Impedimento del paso libre de pulpa hacia la descarga, aumentando la presión en el anillo, lo que incrementa su desgaste y riesgo de posible deformación o fractura. Se eleva el nivel de material acumulado, permitiendo el paso de bolas y pulpa por el centro del anillo.	Sobrecarga en el molino, provocando desequilibrio, aumentando el desgaste de las bolas y revestimientos, causando vibraciones excesivas en rodamientos, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad, elevando su temperatura, activando las alarmas. Sube el nivel de material acumulado, permitiendo el paso de bolas y pulpa por el centro del anillo, ocasionando desgaste, deformación o fractura en el trommel, descargando material de gran tamaño y bolas, impactando en el cajón, llegando incluso a falla catastrófica de las bombas.	Desbordamiento y sobrecalentamiento del molino, afectando gravemente la seguridad y causando mayor consumo energético. Detención por mantenimiento del anillo, trommel, revestimientos, rodamientos y bombas, implicando altos costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.												
								3	Bajo flujo de agua	Impedimento del paso libre de pulpa hacia la descarga, aumentando la presión en el anillo, lo que incrementa su desgaste y riesgo de posible deformación o fractura. Se eleva el nivel de material acumulado, permitiendo el paso de bolas y pulpa por el centro del anillo.	Sobrecarga en el molino, provocando desequilibrio, aumentando el desgaste de las bolas y revestimientos, causando vibraciones excesivas en rodamientos, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad, elevando su temperatura, activando las alarmas. Sube el nivel de material acumulado, permitiendo el paso de bolas y pulpa por el centro del anillo, ocasionando desgaste, deformación o fractura en el trommel, descargando material de gran tamaño y bolas, impactando en el cajón, llegando incluso a falla catastrófica de las bombas.	Desbordamiento y sobrecalentamiento del molino, afectando gravemente la seguridad y causando mayor consumo energético. Detención por mantenimiento del anillo, trommel, revestimientos, rodamientos y bombas, implicando altos costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.												
								4	Velocidad de rotación alta del molino	Impedimento del paso libre de pulpa hacia la descarga, aumentando la presión en el anillo, lo que incrementa su desgaste y riesgo de posible deformación o fractura. Se eleva el nivel de material acumulado, permitiendo el paso de bolas y pulpa por el centro del anillo.	Sobrecarga en el molino, provocando desequilibrio, aumentando el desgaste de las bolas y revestimientos, causando vibraciones excesivas en rodamientos, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad, elevando su temperatura, activando las alarmas. Sube el nivel de material acumulado, permitiendo el paso de bolas y pulpa por el centro del anillo, ocasionando desgaste, deformación o fractura en el trommel, descargando material de gran tamaño y bolas, impactando en el cajón, llegando incluso a falla catastrófica de las bombas.	Desbordamiento y sobrecalentamiento del molino, afectando gravemente la seguridad y causando mayor consumo energético. Detención por mantenimiento del anillo, trommel, revestimientos, rodamientos y bombas, implicando altos costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.												
								5	Colapso del revestimiento del muñón	Impedimento del paso libre de pulpa hacia la descarga, aumentando la presión en el anillo, lo que incrementa su desgaste y riesgo de posible deformación o fractura. Se eleva el nivel de material acumulado, permitiendo el paso de bolas y pulpa por el centro del anillo.	Sobrecarga en el molino, provocando desequilibrio, aumentando el desgaste de las bolas y revestimientos, causando vibraciones excesivas en rodamientos, disminuyendo la eficiencia de molienda y calidad, elevando su temperatura, activando las alarmas. Sube el nivel de material acumulado, permitiendo el paso de bolas y pulpa por el centro del anillo, ocasionando desgaste, deformación o fractura en el trommel, descargando material de gran tamaño y bolas, impactando en el cajón, llegando incluso a falla catastrófica de las bombas.	Desbordamiento y sobrecalentamiento del molino, afectando gravemente la seguridad y causando mayor consumo energético. Detención por mantenimiento del anillo, trommel, revestimientos, rodamientos y bombas, implicando altos costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.												

Figura 6.37: Diagrama FMECA del molino SAG, parte 13. Elaboración propia.

				2	No retiene las bolas de acero	A	Desgaste, deformación o fractura del anillo	<ol style="list-style-type: none"> Sobrecarga de alimentación del molino Abraición o fricción continua de la carga en el anillo Fatiga del anillo por cargas cíclicas Impactos en el anillo Desalineamiento del anillo con el trommel y la carcasa 	Aumento del tamaño de las ranuras, cambios de dimensiones y agujeros grandes en el anillo, perdiendo la capacidad de retener las bolas de molienda, acelerando el desgaste de bolas, revestimiento del muñón y causando impactos, deformación, desgaste o fractura en el trommel.	Se reduce sustancialmente la cantidad de bolas en el molino, provocando disminución significativa de la eficiencia de molienda y calidad, presentando bolas en el producto, impactando en el cajón, llegando incluso a fallas catastróficas de las bombas. Carga desigual en el molino, aumentando el desgaste de revestimientos, entregando producto de gran tamaño, aumentan las vibraciones y temperaturas en rodamientos, activando alarmas.	Desbordamiento y sobrecalentamiento del molino, afectando gravemente la seguridad y causando mayor consumo energético. Detención por mantenimiento del anillo, trommel, revestimientos, rodamientos y bombas, implicando altos costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico del anillo, trommel, bombas, revestimientos, reductor, motor por sobrecalentamiento y rodamientos, con altos riesgos de incendio y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.			2	4	14
21	Trommel	T	Clasificar el material molido reteniendo el material grueso y permitiendo el paso al material más fino a razón de P80 de 8 mm en un flujo de 1530 ton/día	1	No permite el paso de material fino	A	Acumulación de material grueso o fino en la parrilla del trommel	<ol style="list-style-type: none"> Velocidad de rotación muy baja Desgaste, deformación o desajuste de la parrilla Bajo flujo de agua Alimentación desigual del trommel Sobrecarga de alimentación del molino o tamaño de material y bolas de molienda demasiado grandes 	Reducción de la apertura de la parrilla por la acumulación de material, impidiendo el libre paso de material fino, provocando desgaste o deformación debido a la carga adicional y fricción, generando tensión en el soporte del trommel, causando su desalineamiento.	Aumenta la carga circulante en el molino, disminuyendo la capacidad, eficiencia de molienda y calidad del producto, lo que genera un aumento del consumo de energía y posible sobrecarga del motor. Sobrecarga de material en el molino, provocando desgaste en los revestimientos y bolas, aumentando las vibraciones, afectando los rodamientos, engranajes y reductor, causádoles desgaste prematuro y desalineamiento, que activa las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio de revestimientos, rodamientos, trommel, engranajes, reductor, motor y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico de los revestimientos, rodamientos, reductor, motor por sobrecalentamiento, engranajes y trommel, con altos riesgos de incendio y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.			4	2	12
						B	Desgaste o deformación de los paneles de la parrilla	<ol style="list-style-type: none"> Abraición severa de la carga en la parrilla Impactos en la parrilla Sobrecarga de alimentación o tamaño de bolas de molienda demasiado grandes Corrosión Desalineamiento del trommel 	Alteración de las dimensiones de las aberturas de la parrilla, dificultando el libre paso del material fino, lo que genera acumulación de material, aumentando la carga en el trommel, causando tensión en el soporte, ocasionando su desalineamiento.	Aumenta la carga circulante en el molino, disminuyendo la capacidad, eficiencia de molienda y calidad del producto, lo que genera un aumento del consumo de energía y posible sobrecarga del motor. Sobrecarga de material en el molino, provocando desgaste en los revestimientos y bolas, aumentando las vibraciones, afectando los rodamientos, reductor y engranajes, causádoles desgaste prematuro y desalineamiento, que activa las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio de revestimientos, rodamientos, trommel, engranajes, reductor, motor y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico de los revestimientos, rodamientos, reductor, motor por sobrecalentamiento, engranajes y trommel, con altos riesgos de incendio y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.			5	2	16
				2	No clasifica adecuadamente el material	A	Velocidad de rotación irregular del molino	<ol style="list-style-type: none"> Falla en el variador de frecuencia del motor Desgaste en el embrague de aire Desgaste en los rodamientos principales Lubricación insuficiente de los rodamientos Vibraciones excesivas debido a desbalanceo del molino 	Aumenta o disminuye la velocidad de transporte del material dentro del trommel, produciendo una carga desequilibrada, dificultando la separación efectiva de los gruesos y finos, disminuyendo la eficiencia de clasificación y ocasionando desgaste en los paneles de la parrilla.	Aumenta la carga circulante en el molino, disminuyendo la capacidad, eficiencia de molienda y calidad del producto, lo que genera un aumento del consumo de energía y posible sobrecarga del motor. Sobrecarga de material en el molino, provocando desgaste en los revestimientos y bolas, aumentando las vibraciones, afectando los rodamientos, reductor y engranajes, causádoles desgaste prematuro y desalineamiento, que activa las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio de revestimientos, rodamientos, trommel, engranajes, reductor, motor y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico de los revestimientos, rodamientos, reductor, motor por sobrecalentamiento, engranajes y trommel, con altos riesgos de incendio y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.			4	3	17
				3	No retiene el material grueso en la parrilla	A	Desgaste, deformación, rotura o caída de parrilla	<ol style="list-style-type: none"> Abraición severa de la carga en la parrilla Impactos en la parrilla Sobrecarga de alimentación o tamaño de bolas de molienda demasiado grandes Corrosión Desalineamiento del trommel Vibraciones excesivas del molino Desgaste de sujeciones 	Disminuye la eficiencia de clasificación del trommel, aumentando la cantidad de material grueso en la descarga del molino que pasa hacia el cajón de molienda junto con el material fino. Se producen obstrucciones de material que entorpecen la clasificación.	Aumenta la carga circulante en el molino, disminuyendo la capacidad, eficiencia de molienda y calidad del producto, lo que genera un aumento del consumo de energía y posible sobrecarga del motor. Sobrecarga de material en el molino, provocando desgaste en los revestimientos y bolas, aumentando las vibraciones, afectando los rodamientos, reductor y engranajes, causádoles desgaste prematuro y desalineamiento, que activa las alarmas.	Se detiene el molino para reparación y cambio de los paneles del trommel, revestimientos, rodamientos, engranajes, reductor, motor y el alineamiento de componentes, implicando costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico del trommel, revestimientos, rodamientos, reductor, motor por sobrecalentamiento y engranajes, con altos riesgos de incendio y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.			5	3	20
						A	Bajo nivel de grasa en el sistema	<ol style="list-style-type: none"> Mangueras desgastadas, sueltas o con fisuras Falla interruptor de nivel de grasa del tanque Obstrucción en los conductos del sistema Contaminación de la grasa lubricante 	Lubricación insuficiente en componentes del sistema como conductos de engrase, bombas y distribuidores, causando obstrucción parcial o total, generando fricción, llevando al desgaste, corrosión y sobrecalentamiento.	Disminución de la viscosidad de la grasa, aumentando la fricción en superficies en contacto: rodillos, pistas y jaula; produciendo calor, causando desgaste, deformación, grietas, surcos, vibraciones y ruidos excesivos, resultando en desgaste acelerado y desplazamiento o desalineamiento del rodamiento, activando las alarmas. Desgaste de revestimientos y bolas.	Las fugas afectan levemente la seguridad del personal, pero aumentan los riesgos de incendio. Disminuye la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se detiene el molino para reparación y cambio del sistema de lubricación, rodamientos y revestimientos, implicando costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico de rodamientos, sistema de engrase, bastidores y muñones, comprometiendo la estabilidad y soporte del molino, provocando altos riesgos de incendio y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.			4	4	21

Figura 6.38: Diagrama FMECA del molino SAG, parte 14. Elaboración propia.

V	Lubricación	Rociado de grasa del conjunto de engranajes	V	Aplicar grasa de manera intermitente y automática a los dientes del piñón y la corona para reducir la fricción, el desgaste y disipar el calor durante su accionamiento	1	No suministra grasa al piñón y la corona	B	Obstrucción en los conductos de lubricación	1	Contaminación de la grasa lubricante	Aumenta la presión dentro del sistema de engrasado, provocando fugas en juntas y sellos, generando una lubricación insuficiente o nula a los rodamientos y deterioro prematuro de la grasa estancada por efectos de temperaturas y presiones exteriores.	Disminuye la viscosidad de la grasa, aumentando la fricción en las superficies en contacto: rodillos, pistas y jaula; produciendo calor adicional, causando desgaste, deformación, grietas o surcos, generando vibraciones excesivas y ruidos anormales, resultando en desgaste acelerado y desplazamiento del rodamiento, que conduce a desalineamiento, activando las alarmas de temperatura y posición. Desgaste de revestimientos y bolas.	Las fugas afectan levemente la seguridad del personal, pero aumentan los riesgos de incendio. Disminuye la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se detiene el molino para reparación y cambio del sistema de lubricación, rodamientos y revestimientos, implicando costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos, sistema de engrase, bastidores y muñones, comprometiendo la estabilidad y soporte del molino, provocando altos riesgos de incendio y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	4	18	
									2	Desgaste u obstrucción en el filtro de grasa								
									3	Acumulación de residuos de lubricante en los conductos								
									4	Desgaste o deformación en las mangueras de lubricación								
									5	Temperaturas extremas del ambiente								
								C	Temperatura muy alta o muy baja de la grasa	1	Desgaste del aislante de los conductos de lubricación	Degradación prematura de la grasa, provocando viscosidad excesiva y fugas de grasa en el sistema dada la expansión y ruidos anormales, resultando en desgaste acelerado y desplazamiento del rodamiento, que conduce a desalineamiento, activando las alarmas de temperatura y posición. Desgaste de revestimientos y bolas.	Aumenta la fricción en las superficies en contacto de los rodamientos: rodillos, pistas y jaula; produciendo calor adicional, causando desgaste, deformación, grietas o surcos, generando vibraciones excesivas y ruidos anormales, resultando en desgaste acelerado y desplazamiento del rodamiento, que conduce a desalineamiento, activando las alarmas de temperatura y posición. Desgaste de revestimientos y bolas.	Las fugas afectan levemente la seguridad del personal, pero aumentan los riesgos de incendio. Disminuye la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se detiene el molino para reparación y cambio del sistema de lubricación, rodamientos y revestimientos, implicando costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos, sistema de engrase, bastidores y muñones, comprometiendo la estabilidad y soporte del molino, provocando altos riesgos de incendio y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	3	17
										2	Sobrecalentamiento por fricción en los rodamientos							
										3	Contaminación de la grasa lubricante							
										4	Temperaturas extremas del ambiente							
										5	Bajo nivel de grasa							
								D	Baja presión de grasa	1	Obstrucción en los conductos del sistema	Flujo irregular de lubricante, con dificultad para alcanzar todos los puntos de lubricación de manera efectiva, provocando aumento de fricción en los componentes del sistema de engrase, elevando el desgaste y corrosión, disminuyendo así la lubricación en los rodamientos.	Aumenta la fricción en las superficies en contacto de los rodamientos: rodillos, pistas y jaula; produciendo calor adicional, causando desgaste, deformación, grietas o surcos, generando vibraciones excesivas y ruidos anormales, resultando en desgaste acelerado y desplazamiento del rodamiento, que conduce a desalineamiento, activando las alarmas de temperatura y posición. Desgaste de revestimientos y bolas.	Disminuye la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se detiene el molino para reparación y cambio en rodamientos, revestimientos y sistema de lubricación, implicando costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico de los rodamientos, sistema de engrase, bastidores y muñones, comprometiendo la estabilidad y soporte del molino, provocando altos riesgos de incendio y lesiones graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	3	17
										2	Mangueras desgastadas, sueltas o con fisuras							
										3	Desgaste u obstrucción en el filtro							
										4	Bajo nivel de grasa							
										5	Desgaste o daño en la bomba							
A	Bajo nivel de grasa en el sistema	1	Mangueras desgastadas, sueltas o con fisuras	Lubricación insuficiente en componentes del sistema como conductos de engrase, bombas y distribuidores, causando obstrucción parcial o total, generando fricción, llevando al desgaste, corrosión y sobrecalentamiento.	Disminución de la viscosidad de la grasa, aumentando la fricción en dientes en contacto, produciendo calor, causándole desgaste, deformación, grietas o fracturas, generando vibraciones excesivas y ruidos anormales, resultando en desgaste acelerado, desplazamiento o desalineamiento de los engranajes, rodamientos y transmisión, activando las alarmas.	Las fugas afectan levemente la seguridad del personal, pero aumentan los riesgos de incendio. Disminuye la eficiencia de molienda y calidad. Detención para mantenimiento de engranajes, rodamientos, revestimientos y el sistema de lubricación, implicando costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico del sistema de engrase, engranajes, rodamientos, acoples, ejes, reductor y motor, provocando sobrecalentamiento, con altos riesgos de incendio y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	4	3	17								
		2	Falla interruptor de nivel de grasa del tanque															
		3	Obstrucción en los conductos del sistema															
		4	Contaminación de la grasa lubricante															
B	Baja presión de aire en atomizador	1	Desgaste de los filtros de aire	Aplicación inadecuada o insuficiente de grasa a los engranajes. La falta de presión de aire genera un esfuerzo excesivo de los componentes del sistema de rociado, provocándole desgaste prematuro e incluso rotura, causando acumulación de residuos o grasa en los atomizadores, obstruyendo su funcionamiento.	La lubricación inadecuada aumenta la fricción en los dientes en contacto de los engranajes, aumentando la temperatura con riesgo de sobrecalentamiento, causando desgaste, deformación, grietas o fracturas, generando vibraciones excesivas y ruidos anormales, resultando en desgaste acelerado, desplazamiento o desalineamiento de los engranajes, rodamientos y transmisión, activando las alarmas de temperatura y posición.	Disminuye la eficiencia de molienda y calidad del producto. Se detiene el molino para reparación y cambio en el sistema de engrase, engranajes, rodamientos, acoples, ejes, reductor y motor, implicando costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico del sistema de engrase, engranajes, rodamientos, acoples, ejes, reductor y motor, provocando sobrecalentamiento, con altos riesgos de incendio y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	2	8								
		2	Contaminación del aire de inyección															
		3	Conductos de aire con fisuras o daños en las conexiones															
		4	Falla en compresor de aire															
		5	Falla en las válvulas de control															
		6	Desgaste en el atomizador															
C	Obstrucción en los conductos de lubricación	1	Contaminación de la grasa lubricante	Aumenta la presión dentro del sistema de engrasado, provocando fugas en juntas y sellos, generando una lubricación insuficiente o nula a los engranajes y deterioro prematuro de la grasa estancada por efectos de temperaturas y presiones exteriores.	Disminuye la viscosidad de la grasa, aumentando la fricción en los dientes en contacto de los engranajes, aumentando la temperatura con riesgo de sobrecalentamiento, causando desgaste, deformación, grietas o fracturas, generando vibraciones excesivas y ruidos anormales, resultando en desgaste acelerado, desplazamiento o desalineamiento de los engranajes, rodamientos y transmisión, activando las alarmas de temperatura y posición.	Las fugas afectan levemente la seguridad del personal, pero aumentan los riesgos de incendio. Disminuye la eficiencia de molienda y calidad. Se detiene el molino para reparación y cambio del sistema de engrase, engranajes, rodamientos, acoples, ejes, reductor y motor, implicando costos de mantenimiento y pérdida de producción por inactividad.	Colapso catastrófico del sistema de engrase, engranajes, rodamientos, acoples, ejes, reductor y motor, provocando sobrecalentamiento, con altos riesgos de incendio y lesiones muy graves al personal, causando una prolongada inactividad, altas pérdidas de producción y costos elevados de mantenimiento.	3	3	13								
		2	Desgaste u obstrucción en el filtro de grasa															
		3	Acumulación de residuos de lubricante en los conductos															
		4	Desgaste o deformación en las mangueras de lubricación															
		5	Temperaturas extremas del ambiente															

Figura 6.39: Diagrama FMECA del molino SAG, parte 15. Elaboración propia.

Anexo F. Árbol lógico de decisión para el mantenimiento

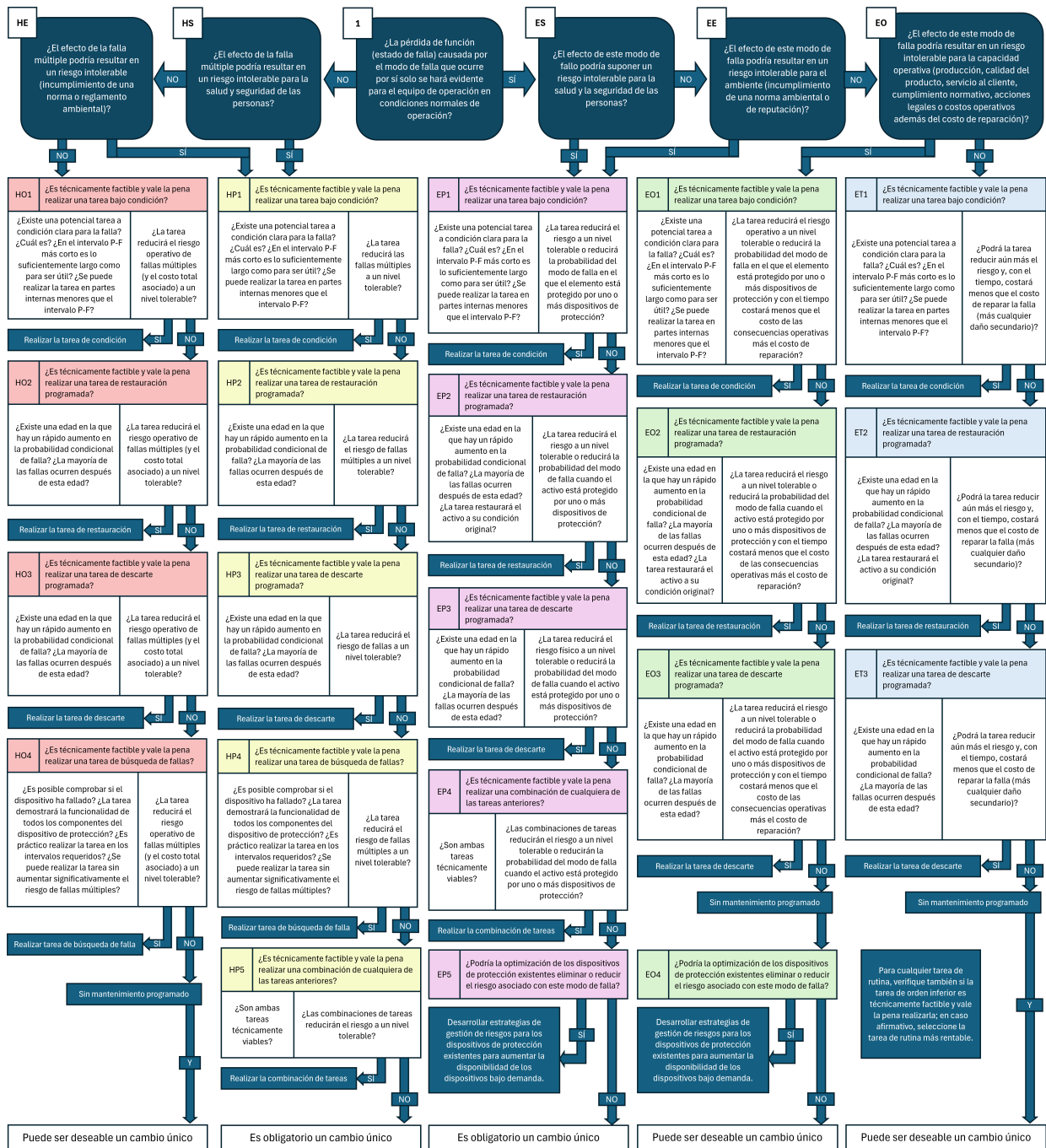


Figura 6.41: Árbol lógico de decisión para el mantenimiento. Elaboración propia.